

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит пояснительную записку, включающую 116 страниц, 35 рисунков, 21 таблиц, 24 источник.

БУРОВАЯ УСТАНОВКА, ЛЕБЕДКА, ДВУХЗОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Объектом исследования является электропривод подъемной лебедки буровой установки БУ 2900/200 ЭПК-БМ, предназначенный для подъема обсадных труб и колон.

Цель работы - разработка и исследование двухзонного электропривода (ЭП) подъемной лебедки буровой установки БУ 2900/200 ЭПК-БМ.

В работе выбраны элементы силовой цепи т.е. замена электродвигателя и тиристорного преобразователя, определены оптимальные параметры настройки регуляторов системы, рассчитаны статические и динамические характеристики, определены качественные показатели.

В результате исследования установлено, что разработанная система соответствует технологическим и техническим требованиям.

В экономической части выпускной квалификационной работы выполнено технико-экономическое обоснование выбора системы, произведен расчет сметы затрат на оборудование и производство работ по монтажу подъемной лебедки буровой установки БУ-2900/200 ЭПК-БМ.

В работе также рассмотрены вопросы безопасности и экологичности, электробезопасности, промышленной санитарии и пожарной безопасности при монтаже, наладке и обслуживании электропривода на буровой установке.

Дипломный проект выполнен в текстовом редакторе Microsoft Word 2007, графическом редакторе Visio 2007. Расчёты производились с помощью пакета прикладных программ MathCAD 2000 Professional. Нелинеаризованный электропривод исследован с помощью программной среды Matlab Simulink .

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	10
2 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ .....	14
2.1 Электропривод подъемной лебедки как объект управления.....	14
2.2 Выбор электродвигателя, расчет параметров .....	18
2.3 Механическая система привода подъемной лебедки.....	22
2.4 Выбор тиристорного преобразователя, расчет параметров .....	30
2.5 Расчет параметров якорной цепи привода.....	32
2.6 Расчет параметров тиристорного возбудителя двигателя.....	34
2.7 Определение области допустимой работы электропривода подъемной лебедки.....	38
2.8 Структурная схема силового канала электропривода подъемной лебедки.....	42
3 ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ.....	43
3.1 Функциональная схема электропривода подъемной лебедки.....	43
3.2 Структурная схема САР скорости электропривода подъемной лебедки.....	50
3.3 Оптимизация контура тока якоря.....	51
3.4 Оптимизация контура скорости.....	54
3.5 Структурная схема САР ЭДС двигателя.....	57
3.6 Оптимизация контура тока возбуждения.....	59
3.7 Оптимизация контура ЭДС двигателя.....	61
3. 8 Расчет статических характеристик	63
4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ.....	68
4.1 Структурная схема нелинейной САУ электропривода подъемной лебедки.....	68
4.2 Настройка САУ электропривода на имитационной модели.....	72
4.3 Исследование САУ электропривода на имитационной модели.....	72
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	74
5.1 SWOT- анализ технического проекта.....	75
5.2 Разработка графика выполнения работ технического проекта.....	78

5.2.2 Определение трудоемкости выполнение работ.....	79
5.3 Определение сметной стоимости пусконаладочных работ.....	82
5.3.3 Отчисление во внебюджетные фонды.....	85
5.3.4 Накладные расходы.....	85
5.3.5 Формирование сметы проекта .....	85
5.4 Определение ресурсоэффективности проека.....	86
6 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЕКТА.....	89
Введение.....	89
6.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	89
6.2 Техника безопасности.....	90
6.3 Производственная санитария.....	95
6.4 Пожарная безопасность.....	105
6.5 Расчет искусственного освещение.....	108
6.6 Охрана окружающей среды.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	115

## **ВВЕДЕНИЕ**

Непрерывное совершенствование технологических процессов связано с необходимостью изготовления новых видов технологического оборудования, обеспечивающего высокую автоматизацию технологического процесса. Автоматизированное технологическое оборудование характеризуется применением технических средств, приборов, систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в технологическом процессе, и направлено на повышение производительности и эффективности труда, улучшение качества продукции, освобождение человека от работы в условиях, опасных для здоровья.

На современном этапе технического развития существенно возрастает роль автоматизированного электропривода, который в значительной степени стал определять прогресс в областях техники и технологии, связанных с воспроизводством механических движений, получаемых путей электромеханического преобразования энергии. Многообразие технологических требований к характеру и качеству механических движений, с одной стороны, обеспечило прогресс в развитии теории и практики электропривода, а с другой стороны, привело к большому разнообразию систем электропривода: от массового для объектов с относительно простыми движениями, до специальных для объектов со сложными и точными движениями.

Хотя и возрастает количество комплектно поставляемых потребителям электроприводов, но и в настоящее время компоненты электропривода выпускаются главным образом отдельно и разрозненно и komponуются разработчиками производственных механизмов и технологических комплексов.

Организация комплексной разработки, комплектной поставки и высокой заводской готовности электроприводов, обладавших инвариантностью к изменениям в элементной базе и технологическом процессе, при высокой надежности систем электропривода и хорошей организации сервиса является важнейшей задачей уже в настоящее время. Все это требует высокой

квалификации инженерных кадров, имеющих хорошую теоретическую и практическую подготовку не только в области электропривода, но и широкого спектра сопредельных областей техники, и обладающих опытом инженерного проектирования современных систем автоматизированного электропривода с использованием средств вычислительной техники.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в теории и практике электропривода переменного тока, массовым промышленным регулируемым электроприводом для буровых установок продолжает оставаться электропривод постоянного тока. Особенность электропривода постоянного тока его заключается в том, что в конструкции привода основных агрегатов отсутствуют громоздкие многоскоростные коробки перемены передач, специальные тормозные машины, сложные оперативные соединительные муфты, спаривающие редукторы и т. д. Конструкция механической части приводов основных агрегатов проста, надежна и долговечна в эксплуатации.

Электрический привод постоянного тока, имея жесткую характеристику и удобное управление, обеспечивает плавное изменение режима работы основных агрегатов (ротора, лебедки, бурового насоса) в широких пределах. Электрические двигатели постоянного тока позволяют применить электрическое торможение, обеспечивающее повышенную производительность и надежность работы подъемной системы, применять автоматизацию спуска и подъема бурильной колонны, необходимость которой при глубоком (2500—6000 м) и особенно сверхглубоком (6000 м и выше) бурении необходима, так как значительно сокращает время на проводку таких скважин.

Таким образом, привод от электродвигателей постоянного тока при сопоставлении со всеми другими типами приводов наиболее полно удовлетворяет постоянно изменяющимся сложным условиям проводки скважин.

Электрический привод удобен для расположения на крупноблочных основаниях, для транспортирования, монтажа и демонтажа, исключает

необходимость в постоянном снабжении буровой горючими и смазочными материалами и повышает безопасность установки в пожарном отношении.

Буровые установки в электрифицированных районах с приводом основных агрегатов от электродвигателей постоянного тока питаются от электросетей 6 кВ. Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется тиристорными преобразователями постоянного тока. Оснащение такими преобразователями буровых установок определяется возможностью поставки электротехнической промышленностью комплектных тиристорных преобразователей.

Необходимость в регулировании электропривода постоянного тока и комплектных тиристорных преобразователей вызывает необходимость установки системы автоматического регулирования. Система автоматического регулирования представляет собой сложную электромеханическую систему, обеспечивающую регулирование скорости в заданном диапазоне с требуемой точностью и быстродействием и в общем случае является системой двух взаимодействующих каналов силового (энергетического), состоящего из участка электрической сети, электрического, электромеханического и механического преобразователей и информационного канала. В состав регулируемого электропривода входят: электродвигатель, силовой полупроводниковый преобразователь, силовой трансформатор, коммутационные дроссели, автоматический выключатель или предохранители.

Целью дипломного проекта является разработка и исследование электропривода постоянного тока подъемной лебедки буровой установки БУ-2900/200 ЭПК-БМ.

## **1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Буровая установка БУ-2900/200 ЭПК БМ предназначена для бурения нефтяных и газовых скважин глубиной 2900 метров с грузоподъемностью на крюке до 200 тонн.

Процесс бурения состоит из последовательности следующих основных операций:

- спуск долота в скважину;
- разрушение породы на забое;
- очистка забоя от выбуренной породы и вынос ее по стволу скважины на поверхность;
- подъем долота после его отработки;
- спуск обсадных труб и ряд других работ.

Буровая установка – это комплекс буровых машин, механизмов и оборудования, смонтированный на точке бурения и обеспечивающий с помощью бурового инструмента самостоятельное выполнение технологических операций по строительству скважин (см. рисунок 1).

Современные буровые установки включают следующие составные части:

- буровое оборудование (талевый механизм, насосы, буровая лебедка, вертлюг, ротор, силовой привод и т.д.);
- буровые сооружения (вышка, основания, сборно-разборные каркасно-панельные укрытия, приемные мостки и стеллажи);
- оборудование для механизации трудоемких работ (регулятор подачи долота, механизмы для автоматизации спускоподъемных операций, пневматический клиновой захват для труб, автоматический буровой ключ, вспомогательная лебедка, пневмораскрепитель, краны для ремонтных работ, пульт контроля процессов бурения, посты управления);
- оборудование для приготовления, очистки и регенерации бурового раствора (блок приготовления, вибросита, песко- и илоотделители, подпорные насосы, емкости для химических реагентов, воды и бурового раствора);

– манифольд (нагнетательная линия в блочном исполнении, дроссельно-запорные устройства, буровой рукав);

– устройства для обогрева блоков буровой установки (тепло - генераторы, отопительные радиаторы и коммуникации для развода теплоносителя).

Исходя из условий технологии бурения скважин, установки подразделяются на классы. За основу классификации принята грузоподъемность на крюке, которая служит критерием использованием той или другой буровой установки для бурения конкретных скважин в зависимости от их глубины и конструкции.



Рисунок 1.1 – Буровая установка

Бурение скважины является сложным производственным процессом, состоящим из отдельных операций, основными из которых являются спускоподъемные операции и углубление скважины.

Спускоподъемные операции включают спуск бурильных труб с породоразрушающим инструментом (бурильной колонной) до забоя скважины и их подъем с отработанным породоразрушающим инструментом на поверхность.

Для производства спускоподъемных операций буровая вышка имеет талевую оснастку, состоящую из кронблока и талевого блока, на которые намотан талевый канат. К талевому блоку крепится крюк, к которому могут



быть прикреплены инструменты для спуска и подъема. Один конец талевого каната крепится к якорю, другой – к лебедке.

Спуск бурильной колонны производится в следующем порядке. Собирают компоновку низа колонны (КНБК), состоящую из долота, колибровочных расширителей, центраторов и утяжеленных бурильных труб, соединенных между собой с помощью переводников. Производят спуск КНБК в скважину. Верхнюю часть закрепляют в роторе клиньями. Отцепляют элеватор и поднимают его до уровня верхней части свечи (несколько бурильных труб, число которых зависит от высоты буровой вышки, соединены муфтами в свечи). Свечи соединяют между собой замками. В элеватор заводят верхний конец свечи, элеватор закрывают и приподнимают всю свечу, чтобы установить ее в верхнюю часть опущенной в скважину бурильной колонны. Производят навинчивание свечи, после чего ее приподнимают, освобождая от клиньев, и производят спуск. Затем в бурильную колонну включают еще одну бурильную трубу, производят спуск колонны с таким расчетом, чтобы долото на 1,5-2 м не дошло до забоя и подсоединяют ведущую бурильную трубу, имеющую четырехгранную, шестигранную или фигурную форму для крепления ее в роторе.

На этом операции по спуску заканчиваются и приступают к углублению скважины.

Непосредственно углубление скважины связано с разрушением породы на забое и транспортировкой разрушенной породы (шлама) от забоя на поверхность.

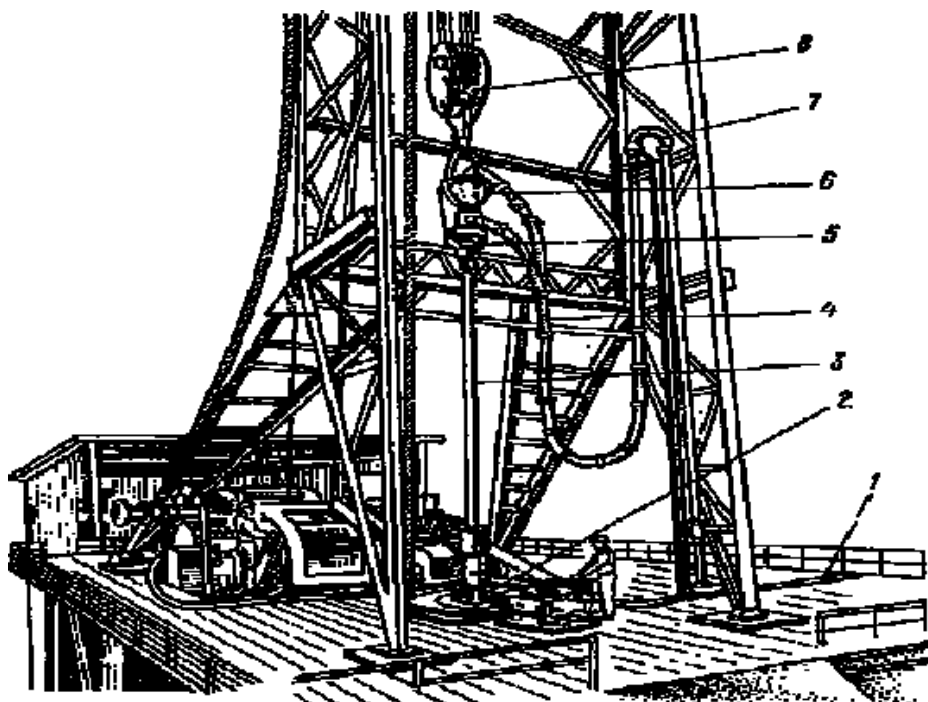


Рисунок 1.2 – Комплекс буровой установки

Транспортировка разрушенной породы на поверхность осуществляется с помощью бурового раствора подаваемого от насосов через их обвязку, гибкий буровой шлаг и вертлюг, ведущую трубу, бурильные трубы к долоту. Из долота через отверстия для промывки буровой раствор поступает к забою и вместе с буровым шламом поднимается на поверхность по кольцевому зазору между стенками скважины и бурильными трубами. На поверхности буровой раствор подвергается очистке от частиц выбуренной породы и по системе желобов направляется в приемную емкость буровых насосов. После этого цикл его движения продолжается.

## 2 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

### 2.1 Электропривод подъемной лебедки как объект управления

Кинематическая схема привода лебедки (см. рисунок 2.1) представляет собой достаточно сложную механическую систему, состоящую из зубчатой коробки передач, внешних цепных и зубчатых передач. МШ1070 и МШ700 – муфты шинопневматические; ТЭП-4500 – тормоз электромагнитный порошковый; М- электродвигатель МПЭ-500-500УХЛЗ-М.

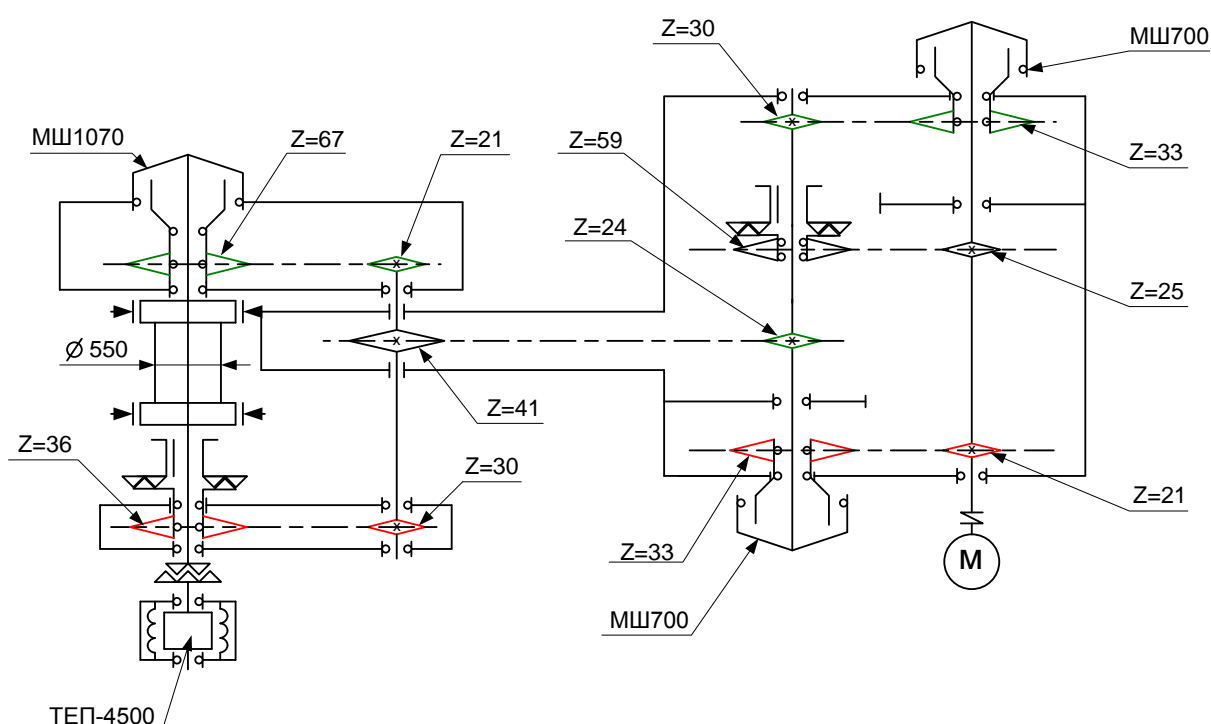


Рисунок 2.1 – Кинематическая схема лебедки

Используется две скорости коробки передач: первая (низшая), при которой передаточное отношение механизма  $i_{л1} = 4,952$ , и вторая (высшая), при которой передаточное отношение  $i_{л2} = 2,586$ . Коэффициент полезного действия механизма лебедки  $\eta_{л} = 0,8$ .

Основным параметром механизма лебедки является вес (сила тяжести)

$$F_k = m_k \cdot g, \text{ Н}, \quad (2.1)$$

где  $m_k$  – максимальная критическая масса колонны,  $m_k = 200 \text{ т}$ .

При подъеме колонны ее вес уменьшается. В процессе подъема должна поддерживаться постоянная мощность подъемной лебедки, следовательно, и мощность на валу приводного двигателя. Это достигается выполнением условия:

$$F_k \cdot V_k = const. \quad (2.2)$$

Соответствующая зависимость  $F_k(V_k)$  приведена на рисунке 2.2.

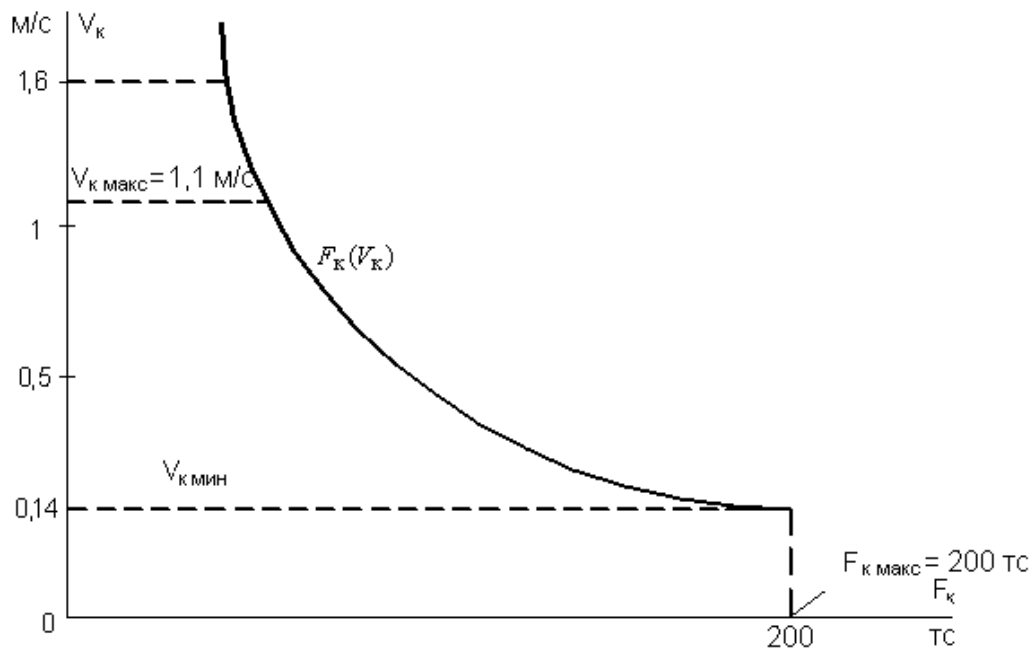


Рисунок 2.2 – Силовая характеристика подъемной лебедки

Мощность подъема при минимальной скорости  $V_{\min} = 0,14$  м/с

$$P_{\text{под}} = F_{\text{к макс}} \cdot 9,81 \cdot V_{\text{к мин}} = 200 \cdot 9,81 \cdot 0,14 = 274,68 \text{ кВт}, \quad (2.3)$$

где  $V_{\text{к мин}}$  – минимальная скорость подъема.

При дальнейшем увеличении скорости подъема мощность должна поддерживаться постоянной. Диапазон регулирования

$$D = \frac{V_{\text{к макс}}}{V_{\text{к мин}}} = \frac{1,1}{0,14} = 7,86. \quad (2.4)$$

В электроприводе регулирование скорости при постоянной мощности достигается ослаблением потока возбуждения двигателя. Однако обеспечить требуемый диапазон регулирования ослаблением потока практически

невозможно. Поэтому принято двухзонное регулирование скорости электропривода с использованием двухскоростной коробки передач.

Требуемая максимальная скорость электродвигателя при ослабленном поле и  $i_{л2} = 2,586$

$$n_{дв\max 2} \geq \frac{60 \cdot V_{\text{кмакс}} \cdot i_{л2} \cdot i_{\text{пол}}}{\pi \cdot D_6} = \frac{60 \cdot 1,1 \cdot 2,586 \cdot 10}{3,14 \cdot 0,55} = 988,3 \text{ об/мин}, \quad (2.5)$$

где  $i_{\text{пол}}$  – коэффициент полиспаста,  $i_{\text{пол}} = 10$ ;

$D_6$  – диаметр барабана,  $D_6 = 0,55 \text{ м}$ .

Тогда скорость двигателя на пониженной передаче  $i_{л1} = 4,952$

$$n_{дв\max 1} = n_{дв\max 2} \cdot \frac{i_{л2}}{i_{л1}} = 988,3 \cdot \frac{2,586}{4,952} = 516,1 \text{ об/мин}. \quad (2.6)$$

Для построения предельных механических характеристик электропривода необходимо привести к валу двигателя подъемные усилия и скорость подъема:

$$M_{дв} = \frac{m_k \cdot g \cdot D_6}{2 \cdot i_{л} \cdot i_{\text{пол}} \cdot \eta_{л}}; \quad (2.7)$$

$$n_{дв} = \frac{60 \cdot V \cdot i_{л} \cdot i_{\text{пол}}}{\pi \cdot D_6}. \quad (2.8)$$

Режим работы электропривода подъемной лебедки длительный с переменной нагрузкой. Максимальная длительная нагрузка, которую он должен преодолевать при токе не большем номинального, соответствует мощности на валу двигателя

$$P_{дв} = \frac{P_{\text{под}}}{\eta_{л}} = \frac{274,68}{0,8} = 343,35 \text{ кВт}. \quad (2.10)$$

Данные приведены выше.

Предельные механические характеристики привода приведены на рисунке 2.3.

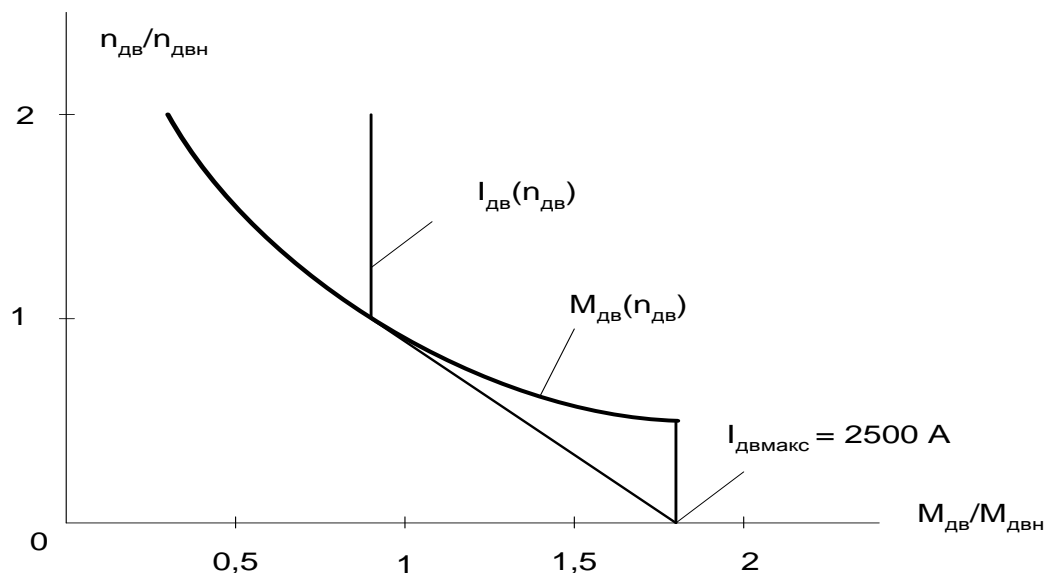


Рисунок 2.3 - Предельная механическая характеристика электропривода подъемной лебедки

Поддержание постоянства мощности подъемной лебедки в автоматическом режиме осуществляется регулятором мощности РМЛ и нелинейным устройством УН, управляемым от датчика (см. рисунок 3.1).

В ручном режиме скорость лебедки задается оператором в зависимости от веса колонны. Соответствующие зависимости приведены на рисунках 2.4 и 2.5.

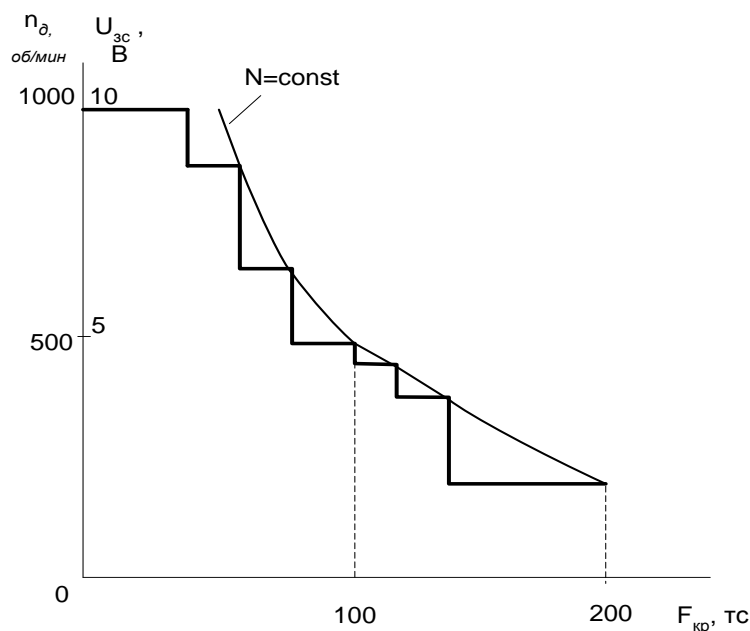


Рисунок 2.4 - График регулирования скорости при ручном задании веса на первой передаче

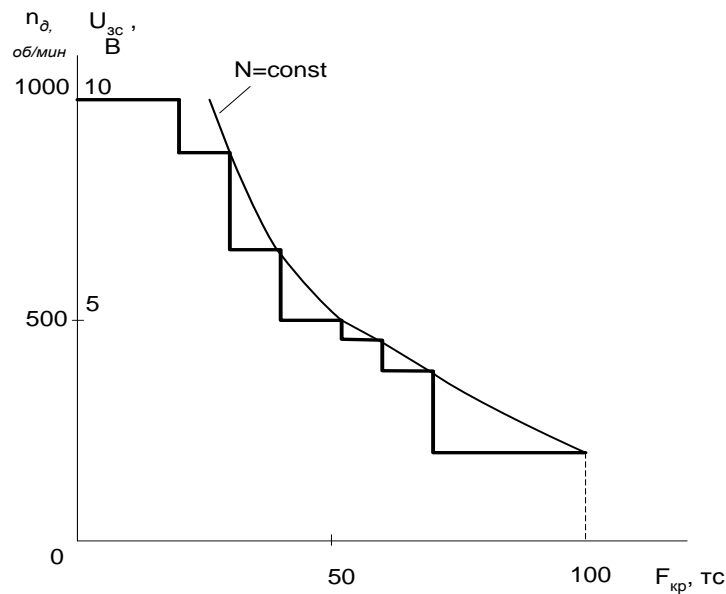


Рисунок 2.5 - График регулирования скорости при ручном задании веса на второй передаче

## 2.2 Выбор электродвигателя, расчет параметров

Режим работы механизма подъемной лебедки длительный, поэтому мощность двигателя выбирается по максимальной нагрузке

$$P_{дв н} \geq P_{дв макс} \cdot \quad (2.11)$$

Скорость двигателя выбирается из условий:

$$n_{дв н} \geq n_{дв макс1}; \quad (2.12)$$

$$n_{дв макс} \geq n_{дв макс2} \cdot \quad (2.13)$$

В электроприводе подъемной лебедки буровой установки используется электродвигатель постоянного тока, входящий в состав электропривода ротора. Этот электродвигатель выбирается исходя из требований, предъявляемых к электроприводу лебедки. Номинальная скорость двигателя соответствует максимальной скорости вращения лебедки.

Для рассматриваемого электропривода подъемной лебедки буровой установки БУ-2900/200 ЭПК-БМ используют двигатель постоянного тока МПЭ-500-500.

Паспортные данные двигателя марки МПЭ-500-500 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Паспортные параметры электродвигателя МПЭ-500-500

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВт	$P_{\text{двн}}$	560
Номинальное напряжение, В	$U_{\text{двн}}$	440
Номинальная скорость вращения, об/мин	$n_{\text{двн}}$	500
Номинальный ток возбуждения, А	$I_{\text{вн}}$	22
Номинальное напряжение возбуждения, В	$U_{\text{вн}}$	220
Максимальная скорость вращения, об/мин	$n_{\text{двмакс}}$	1000
Момент инерции якоря, кг · м <sup>2</sup>	$J_{\text{дв}}$	40
Сопротивление обмотки якоря при 15°C, мОм	$R_{\text{оя}}$	7,29
Сопротивление обмотки возбуждения при 15°C, Ом	$R_{\text{ов}}$	5,5
Сопротивление дополнительных полюсов при 15°C, мОм	$R_{\text{дп}}$	1,98
Сопротивление компенсационной обмотки при 15°C, мОм	$R_{\text{ко}}$	3,28
Число полюсов	$2p$	4
КПД двигателя, %	$\eta$	92
Число витков обмотки возбуждения на полюс	$W_{\text{в}}$	320
Максимально допустимый ток перегрузки двигателя, А	$I_{\text{двмакс}}$	$2,5I_{\text{двн}}$
Номинальный поток возбуждения на полюс, Вб	$\Phi_{\text{двн}}$	0,0629



Кривая намагничивания двигателя приведена на рисунке 2.6.

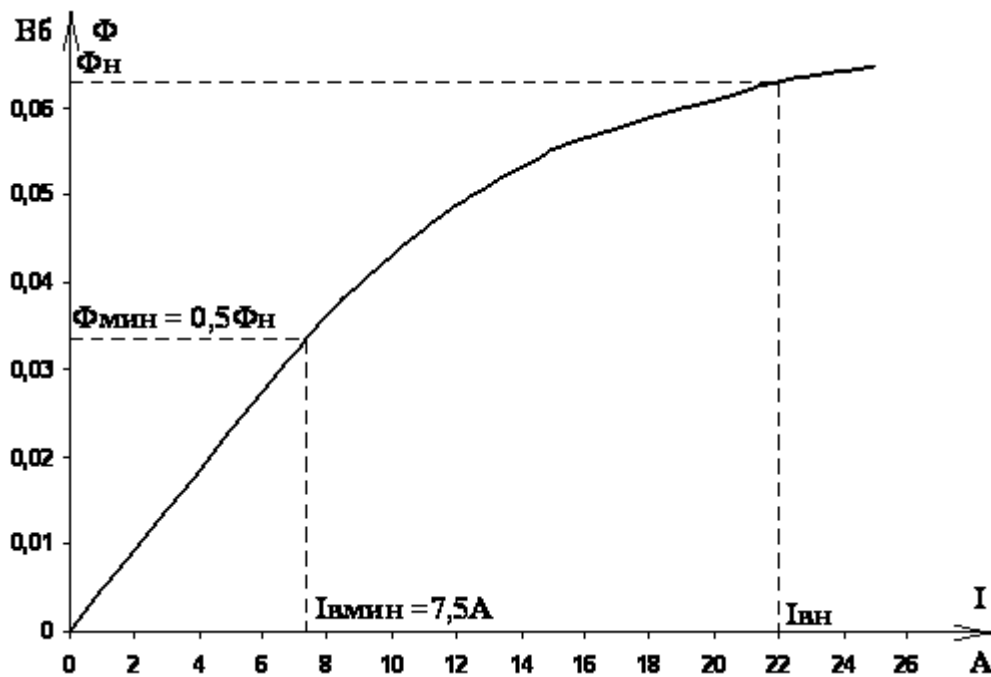


Рисунок 2.6 – Кривая намагничивания двигателя МПЭ-500-500

### Расчетные параметры двигателя

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{двн}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{дв}} \cdot U_{\text{двн}}} = \frac{10^3 \cdot 560 \cdot 100}{92,9 \cdot 440} = 1370 \text{ А.} \quad (2.14)$$

Номинальная угловая скорость

$$\omega_{\text{двн}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{двн}}}{30} = \frac{3,14159 \cdot 500}{30} = 52,36 \text{ рад/с.} \quad (2.15)$$

Максимальная угловая скорость двигателя

$$\omega_{\text{дв макс}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв макс}}}{30} = \frac{3,14159 \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с} \quad (2.16)$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{двн}}}{\omega_{\text{двн}}} = \frac{560 \cdot 10^3}{52,36} = 10695,2 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.17)$$

Индуктивность двигателя

$$L_{\text{дв}} \cong \gamma \cdot \frac{U_{\text{дв н}}}{p \cdot \omega_{\text{дв н}} \cdot I_{\text{дв н}}} = 0,15 \cdot \frac{440}{2 \cdot 52,36 \cdot 1370} = 0,00046 \text{ Гн}, \quad (2.18)$$

где  $\gamma = 0,1 \div 0,2$  – для машин с компенсационной обмоткой, принимаем  $\gamma = 0,15$ .

Сопротивление двигателя в холодном состоянии

$$R_{\text{дв}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} = 0,00729 + 0,00198 + 0,00328 = 0,01255 \text{ Ом}. \quad (2.19)$$

Сопротивление двигателя в горячем состоянии. Примем температуру перегрева обмоток  $80^\circ \text{C}$ , тогда

$$R_{\text{дв гор}} = 1,32 \cdot R_{\text{дв}} = 1,32 \cdot 0,01255 = 0,0166 \text{ Ом}. \quad (2.20)$$

Коэффициент ЭДС  $\left( \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right)$  и электромагнитного момента  $\left( \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right)$  при

номинальном потоке возбуждения

$$C = (K \cdot \Phi_{\text{дв н}}) = \frac{U_{\text{дв н}} - I_{\text{дв н}} \cdot R_{\text{дв гор}}}{\omega_{\text{дв н}}} = \frac{440 - 1370 \cdot 0,0166}{52,36} = 7,97 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (2.21)$$

Конструктивный коэффициент двигателя

$$K = \frac{(K \cdot \Phi_{\text{дв н}})}{\Phi_{\text{дв н}}} = \frac{7,97}{0,0629} = 126,7 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}. \quad (2.22)$$

### ***Расчет параметров цепи обмотки возбуждения двигателя***

Индуктивность обмотки возбуждения от основного потока согласно графику кривой намагничивания (рисунок 8):

- на начальном участке кривой намагничивания (максимальное значение)

$$L_{\text{ов макс}} = 2 \cdot p \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\Delta \Phi_{\text{в}}}{\Delta I_{\text{ов}}} = 4 \cdot 320 \cdot \frac{0,06}{7} = 10,97 \text{ Гн}, \quad (2.23)$$

- в точке номинального режима работы (минимальное значение)

$$L_{\text{ов мин}} = 2 \cdot p \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\Delta \Phi_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{в н}}} = 4 \cdot 320 \cdot \frac{0,012}{11} = 1,4 \text{ Гн}, \quad (2.24)$$

- усредненное значение на рабочем участке ( $\Phi_{\text{мин}} \div \Phi_{\text{н}}$ )

$$L_{\text{ов ср}} = 2 \cdot p \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\Delta \Phi_{\text{ср}}}{\Delta I_{\text{в ср}}} = 4 \cdot 320 \cdot \frac{0,06}{15} = 5,12 \text{ Гн.} \quad (2.25)$$

Индуктивность потока рассеяния

$$L_s = 2 \cdot p \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\sigma \cdot \Phi_{\text{н}}}{I_{\text{вн}}} = 4 \cdot 320 \cdot \frac{0,18 \cdot 0,0669}{22} = 0,70062545 \text{ Гн.} \quad (2.26)$$

Сопротивление обмотки возбуждения горячее

$$R_{\text{овгор}} = 1,3 \cdot R_{\text{ов}} = 1,3 \cdot 5,5 = 7,15 \text{ Ом.} \quad (2.27)$$

### 2.3 Механическая система привода подъемной лебедки

Расчетная схема механической системы электропривода лебедки представляет собой двухмассовую систему, представленную на рисунке 2.7, где приняты следующие обозначения:

$J_1$  – момент инерции двигателя и механизма;

$J_2$  – момент инерции поднимаемых масс;

$M_{\text{дв эм}}$  – электромагнитный момент двигателя;

$M_{\text{с}}$  – момент сопротивления типа сухого трения на валу первой массы;

$M_{\text{гр}}$  – момент нагрузки, развиваемый грузом, активный по характеру;

$C_{\varphi 12}$  – эквивалентная угловая жесткость;

$b_{\text{в}12}$  – эквивалентный коэффициент внутреннего демпфирования.

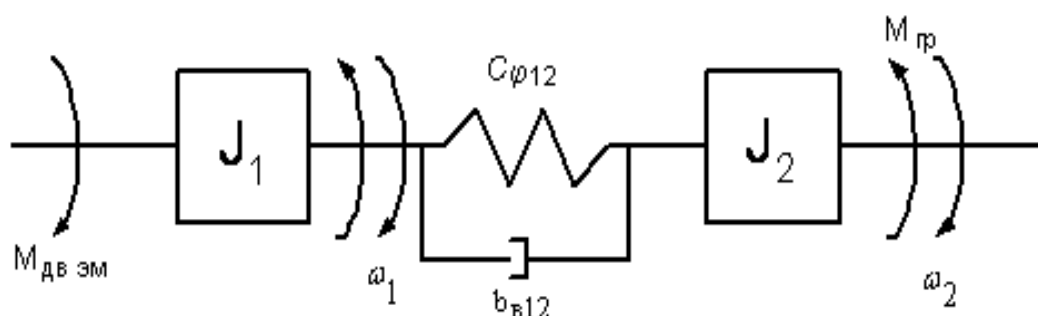


Рисунок 2.7 – Расчетная схема механической системы электропривода подъемной лебедки

### Параметры элементов механической системы привода

Момент инерции двигателя

$$J_{\text{дв}} = 40 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.28)$$

Момент инерции редуктора

$$J_{\text{мех}} = 0,25 \cdot J_{\text{дв}} = 0,25 \cdot 40 = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.29)$$

Момент инерции поднимаемых масс, приведенный к валу двигателя, определим по выражению

$$J_m = m \cdot \left( \frac{D_6}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_{\text{л}}^2} \cdot \frac{1}{i_{\text{пол}}^2}, \text{кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.30)$$

где  $m$  – масса поднимаемого груза, кг;

$D_6$  – диаметр барабана лебедки,  $D_6 = 0,55 \text{ м}$ ;

$i_{\text{л}}$  – результирующее передаточное число механизма лебедки;

$i_{\text{пол}}$  – коэффициент полиспаста,  $i_{\text{пол}} = 10$ .

Момент инерции поднимаемых масс на первой передаче  $i_{\text{л1}} = 4,952$  при поднимаемой массе  $m = (100 \div 200) \cdot 10^3 \text{ кг}$

$$J_m = (100 \div 200) \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{0,55}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{4,952^2} \cdot \frac{1}{10^2} = (3,084 \div 6,17) \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.31)$$

Момент инерции поднимаемых масс на второй передаче  $i_{\text{л2}} = 2,586$  при  $m = (5,23 \div 100) \cdot 10^3 \text{ кг}$

$$J_m = (5,23 \div 100) \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{0,55}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2,586^2} \cdot \frac{1}{10^2} = (0,59 \div 11,31) \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.32)$$

Собственный момент сопротивления на валу электродвигателя

$$M_{\text{с дв}} = C \cdot I_{\text{дв н}} - M_{\text{дв н}} = 7,97 \cdot 1370 - 10695,2 = 223,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.33)$$

Постоянные потери в передаточном механизме лебедки

$$M_{\text{пост}} = a \cdot M_{\text{пер н}} = 0,125 \cdot 10695,2 = 1336,9 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.34)$$

где  $M_{\text{пер н}} \cong M_{\text{дв н}} = 10695,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$  – номинальный передаваемый момент механизма;

$$a = b = \frac{1 - \eta_{\text{пер ном}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер ном}}} = \frac{1 - 0,8}{2 \cdot 0,8} = 0,125 \quad (2.35)$$

$a$  – коэффициент постоянных потерь в передаче;

$b$  – коэффициент переменных потерь в передаче;

$\eta_{\text{пер ном}}$  – КПД передаточного механизма; для лебедок  $\eta_{\text{пер ном}} = (0,8 \div 0,85)$ ,

принимаем  $\eta_{\text{пер ном}} = \eta_{\text{л}} = 0,8$ .

Момент, создаваемый грузом на первой передаче  $i_{\text{л1}} = 4,952$

$$M_{\text{гр}} = \frac{m \cdot q \cdot D_{\text{б}}}{2i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}} = \frac{(100 \div 200) \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 0,55}{2 \cdot 4,952 \cdot 10} = (5447,8 \div 10895,6) \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.36)$$

Момент, создаваемый грузом на второй передаче  $i_{\text{л2}} = 2,586$

$$M_{\text{гр}} = \frac{(5,23 \div 100) \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,55}{2 \cdot 2,586 \cdot 10} = (545,6 \div 10432,1) \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.37)$$

Эквивалентная линейная жесткость подъемного каната для компоновочной схемы с  $i_{\text{пол}} = 10$  (см. рисунок 2.8) определяется по выражению

$$C_{\text{лз}} = \frac{C_{\text{л1}} \cdot C_{\text{л2}}}{C_{\text{л1}} + C_{\text{л2}}}, \text{ Н/м},$$

где 
$$C_{\text{л1}} = \frac{C_{\text{к}}}{l_1} = \frac{38,375 \cdot 10^6}{50} = 76,75 \cdot 10^5 \text{ Н/м} \quad (2.38)$$

- линейная жесткость начального участка каната длиной  $l = 50 \text{ м}$ ;

$$C_{\text{л2}} = i_{\text{пол}} \cdot \frac{C_{\text{к}}}{l_2} = 10 \cdot \frac{38,375 \cdot 10^6}{45} = 8,53 \cdot 10^6 \text{ Н/м} \quad (2.39)$$

- линейная жесткость конечного участка длиной  $l = 45 \text{ м}$

$$C_{\text{к}} = E_{\text{к}} \cdot S_{\text{к}} = 1,25 \cdot 10^{11} \cdot 3,07 \cdot 10^{-4} = 38,375 \cdot 10^6 \text{ Н} \quad (2.40)$$

- жесткость одного погонного метра каната;

$$E_{\text{к}} = (1,1 \div 1,4) \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2 \quad (2.41)$$

- модуль продольной упругости для стального каната, принимаем

$$E_k = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2;$$

$$S_k = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} = 0,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.42)$$

-площадь сечения проволок.

При изменении высоты подъема эквивалентная жесткость канатов изменяется в малых пределах, так как при этом будет изменяться только длина параллельно включенных канатов в талевой системе. Если учесть, что их жесткость значительно превышает жесткость начального и конечного участков, то жесткостью этой части кинематической цепи можно пренебречь. Тогда эквивалентная жесткость системы канатов

$$C_b = 7,675 \cdot 10^6 + 8,53 \cdot 10^6 = 16,204 \cdot 10^6 \text{ Н/м.} \quad (2.43)$$

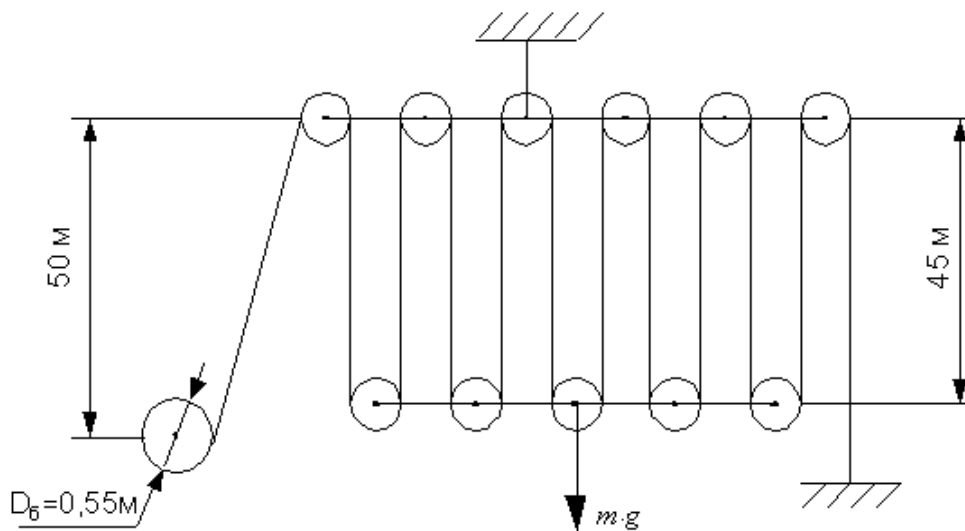


Рисунок 2.8 – Схема заправки каната подъемной лебедки

#### Параметры двухмассовой механической системы

Структурная схема двухмассовой механической системы (ДМС) привода подъема приведена на рисунке 2.10(а).

Момент инерции первой массы

$$J_1 = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 40 + 10 = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.44)$$

Момент сопротивления на валу первой массы

$$M_c = M_{c_{дв}} + M_{пост} = 169,5 + 1336,9 = 1506,4 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.45)$$

Момент инерции второй массы и соответствующий грузовой момент на ее оси при работе на первой передаче  $i_{л1} = 4,952$

$$J_2 = (3,084 \div 6,17) \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.46)$$

$$M_{гр} = (5447,8 \div 10895,6) \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.47)$$

Момент инерции второй массы и соответствующий грузовой момент на ее оси при работе на второй передаче  $i_{л2} = 2,586$

$$J_2 = (0,59 \div 11,31) \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.48)$$

$$M_{гр} = (545,6 \div 10432,1) \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.49)$$

Значение приведенного углового коэффициента жесткости ДМС изменяется в пределах от максимального значения в верхнем положении:

$$C_{\varphi 12 \text{ верх}} = C_{l_{\text{эверх}}} \cdot \frac{D_6^2}{4 \cdot i_{л1}^2} = 6,73 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,55^2}{4 \cdot 4,952^2} = 2,1 \cdot 10^4, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \quad (2.50)$$

- при работе на первой передаче;

$$C_{\varphi 12 \text{ верх}} = 6,73 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,55^2}{4 \cdot 2,586^2} = 76,1 \cdot 10^4 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \quad (2.51)$$

- при работе на второй передаче,

до минимального значения в нижнем положении:

$$C_{\varphi 12 \text{ нижн}} = C_{l_{\text{энижн}}} \cdot \frac{D_6^2}{4 \cdot i_{л1}^2} = 4,04 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,55^2}{4 \cdot 4,952^2} = 12,45 \cdot 10^3 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \quad (2.52)$$

- при работе на первой передаче;

$$C_{\varphi 12 \text{ нижн}} = 4,04 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,55^2}{4 \cdot 2,586^2} = 45,68 \cdot 10^3 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \quad (2.53)$$

- при работе на второй передаче.

Минимальное значение угловой частоты резонансных колебаний ДМС будет иметь место в нижнем положении крюка-блока при работе на второй передаче  $i_{л2} = 2,586$  с максимальной массой груза  $m = 100$  тонн

$$\omega_{12\text{нижн}}^{(2)} = \sqrt{\frac{C_{\varphi 12\text{нижн}} \cdot (J_1 + J_{2\text{макс}})}{J_1 \cdot J_{2\text{макс}}}} = \sqrt{\frac{45,68 \cdot 10^3 \cdot (50 + 11,31)}{50 \cdot 11,31}} = 73,85 \text{ рад/с.} \quad (2.54)$$

Резонансная частота ДМС в нижнем положении крюка-блока, при работе на первой передаче  $i_{л1} = 4.952$  с максимальной массой груза  $m = 200$  т

$$\omega_{12\text{нижн}}^{(1)} = \sqrt{\frac{C_{\varphi 12\text{нижн}} \cdot (J_1 + J_{2\text{макс}})}{J_1 \cdot J_{2\text{макс}}}} = \sqrt{\frac{12,45 \cdot 10^3 \cdot (50 + 6,17)}{50 \cdot 6,17}} = 47,61 \text{ рад/с.} \quad (2.55)$$

Коэффициент внутреннего демпфирования ДМС в нижнем положении ориентировочно может быть определен по выражению

$$b_{в12\text{нижн}} = \frac{\lambda_{вТ} \cdot C_{\varphi 12\text{нижн}}}{\pi \cdot \omega_{12\text{нижн}}}, \quad (2.56)$$

где  $\lambda_{вТ} = 0,1 \div 0,2$  – декремент затухания механических колебаний под действием внутренних сил вязкого трения.

Для работы на первой передаче

$$b_{в12\text{нижн}} = \frac{(0,1 \div 0,2) \cdot 12,45 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 47,61} = (8,328 \div 16,656). \quad (2.57)$$

Для работы на второй передаче

$$b_{в12\text{нижн}} = \frac{(0,1 \div 0,2) \cdot 45,68 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 73,187} = (19,187 \div 39,755). \quad (2.58)$$

На рисунке 2.9 приведены зависимости  $J_2(m)$ ,  $M_{гр}(m)$  и  $\omega_{12}(m)$ .



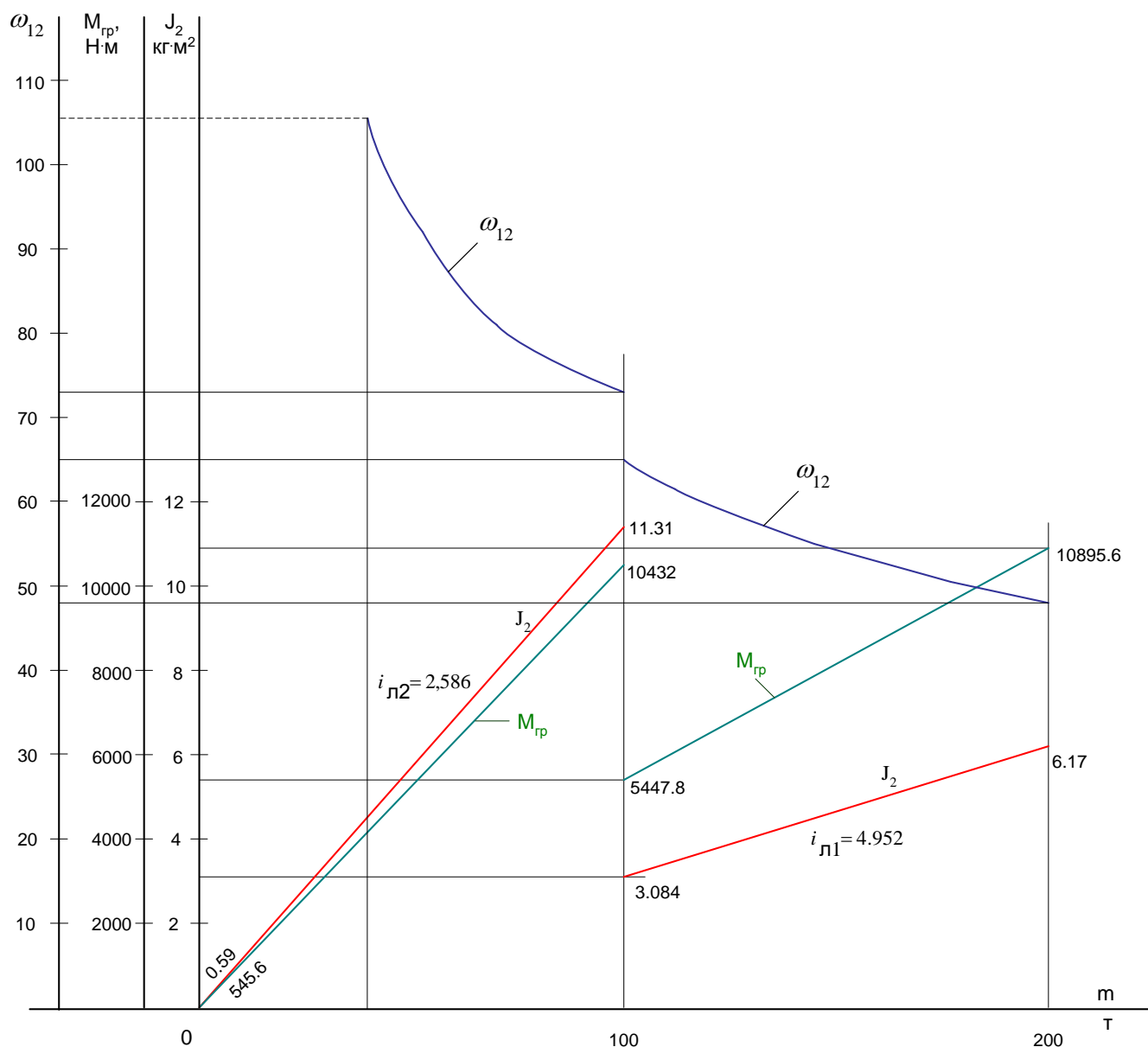


Рисунок 2.9 - Зависимость параметров ДМС привода подъема от массы груза

### Параметры одномассовой механической системы

Структурная схема одномассовой механической системы (ОМС) приведена на рисунке 2.10(б).

Эквивалентный момент инерции на первой передаче ( $i_{л1} = 4.952$ )

$$J_9 = J_1 + J_2 = 50 + (3,084 \div 6,17) = (53,084 \div 56,17) \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.59)$$

и на второй передаче  $i_{л2} = 2,586$

$$J_9 = J_1 + J_2 = 50 + (0,59 \div 11,31) = (50,59 \div 61,31) \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.60)$$

Момент сопротивления реактивного характера на оси эквивалентной массы

$$M_c = M_{сдв} + M_{пост} = 223,7 + 1336,9 = 1560,6 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.61)$$

Момент, развиваемый грузом на первой передаче ( $i_{л1} = 4.952$ ),

$$M_{гр} = (5447,8 \div 10895,6) \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.62)$$

и на второй передаче ( $i_{л2} = 2,586$ )

$$M_{гр} = (545,6 \div 10432,1) \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.63)$$

Электромеханическая постоянная времени привода наиболее существенно изменяется при работе на второй передаче и имеет минимальное значение

$$T_{м мин} = \frac{J_{э мин} \cdot R_{яц}}{C^2} = \frac{50,59 \cdot 0,03}{7,93^2} = 0,024 \text{ с} \quad (2.64)$$

и максимальное значение

$$T_{м макс} = \frac{J_{э макс} \cdot R_{яц}}{C^2} = \frac{61,31 \cdot 0,03}{7,93^2} = 0,029 \text{ с}. \quad (2.65)$$

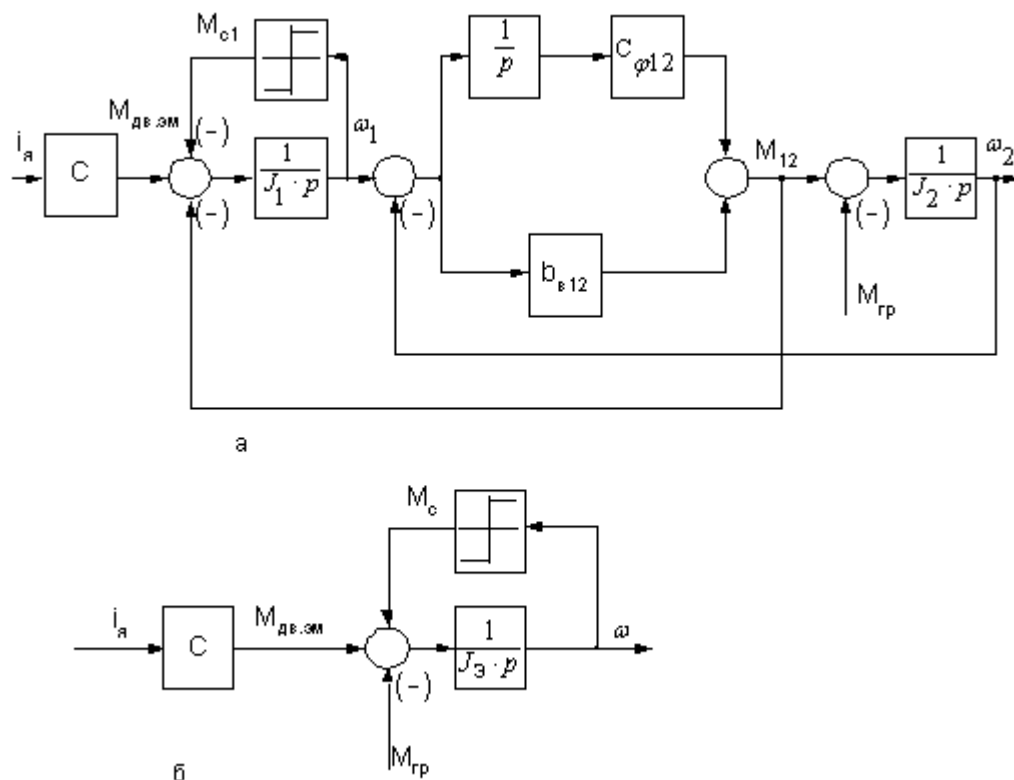


Рисунок 2.10 - Структурная схема механической системы привода лебедки:

а – ДМС; б – ОМС.

## 2.4 Выбор тиристорного преобразователя, расчет параметров

Условиями выбора преобразователя являются:

$$U_{dH} \geq U_{дв H}; \quad I_{dH} \geq I_{дв H}; \quad I_{d\max} \geq I_{дв \max}.$$

По параметрам двигателя:

$$U_{дв H} = 440 \text{ В}, \quad I_{дв H} = 1370 \text{ А}, \quad I_{дв \max} = 2.5 \cdot 1370 = 3425 \text{ А} \quad (2.66)$$

выбираем преобразователь специального исполнения с техническими характеристиками:

- преобразователь нереверсивный;
- трехфазная мостовая схема выпрямления;
- преобразователь состоит из двух управляемых выпрямителей, включенных параллельно двухкомплектные преобразователи, в составе регулируемого электропривода постоянного тока, позволяют регулировать скорость двигателя во всех четырех квадрантах (см. рисунок 2.11);
- сглаживающего реактора в якорной цепи нет;
- $U_{dH} = 460 \text{ В}$ ;
- $I_{dH} = 1600 \text{ А}$ ;
- $I_{d\max} = 2,25 \cdot I_{dH} = 3600 \text{ А}$  - в течение 10 с.

### Выбор трехфазного токоограничивающего реактора

Необходимое значение полного сопротивления обмотки фазы реактора

$$Z_{\text{фрасч}} = \frac{U_{\text{кз}} \% \cdot U_{\text{сф}}}{100 \cdot I_{\text{фрасч}}} = \frac{5,5 \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 586,2} = 0,0205 \text{ Ом}, \quad (2.67)$$

$$\text{где } I_{\text{фрасч}} = k_{i2\phi} \cdot k_i \cdot \frac{I_{\text{ДВН}}}{2} = 0,815 \cdot 1,05 \cdot \frac{1370}{2} = 586,2 \text{ A}; \quad (2.68)$$

$U_{\text{сф}}$  - фазное напряжение питающей сети,  $U_{\text{сф}} = 380 \text{ В}$ ;

$U_{\text{кз}}$  - напряжение короткого замыкания реактора, принимаем  $U_{\text{кз}} = 5,5 \%$ .

Предварительно пренебрегаем активным сопротивлением обмоток реактора, тогда  $X_{\text{фрасч}} = Z_{\phi}$  и необходимое значение индуктивности обмотки фазы реактора

$$L_{\text{фрасч}} = \frac{X_{\text{фрасч}}}{\omega_c} = \frac{0,02058}{314} = 0,066 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.69)$$

Выбираем трехфазный токоограничивающий реактор типа РТСТ-660-0,64У3 с паспортными данными:

$$U_{\text{л}} = 410 \text{ В}; I_{\text{фн}} = 660 \text{ А}; R_{\text{рф}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; L_{\text{р}} = 0,064 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.70)$$

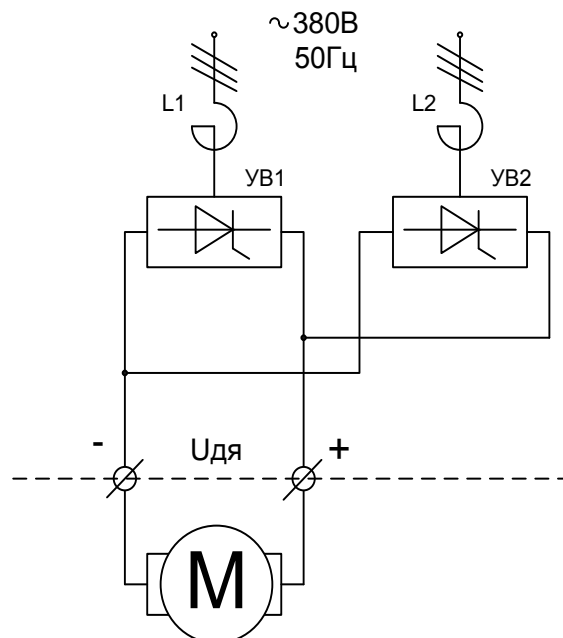


Рисунок 2.11 – Схема электрическая силовой цепи привода лебедки

Индуктивное сопротивление обмотки фазы реактора

$$X_{\text{фрасч}} = \omega_c \cdot L_p = 314 \cdot 0,000064 = 20,096 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.71)$$

Активное сопротивление от коммутации анодных токов

$$R_k = \frac{m_b \cdot X_{\text{фрасч}}}{2 \cdot \pi} = \frac{6 \cdot 20,096 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 0,0192 \text{ Ом.} \quad (2.72)$$

Схема выпрямления трехфазная мостовая  $m_b = 6$ .

## 2.5 Расчет параметров якорной цепи привода

Сопротивление якорной цепи с учетом параллельного включения двух выпрямительных мостов

$$\begin{aligned} R_{\text{яц}} &= R_{\text{тп}} + R_{\text{двгор}} + 0,1 \cdot R_{\text{двгор}} = \\ &= 11,6 \cdot 10^{-3} + 16,6 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 16,6 \cdot 10^{-3} = 29,86 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,} \end{aligned} \quad (2.73)$$

где

$$R_{\text{тп}} = \left( \frac{2 \cdot R_{\text{рф}} + R_k}{2} \right) = \left( \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} + 19 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \quad (2.74)$$

- сопротивление силовой цепи преобразователя.

Индуктивность якорной цепи

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{дв}} + L_{\text{тп}} = 0,46 \cdot 10^{-3} + 0,64 \cdot 10^{-4} = 0,524 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,} \quad (2.75)$$

где  $L_{\text{тп}} = \frac{2 \cdot L_{\text{рф}}}{2} = \frac{2 \cdot 0,64 \cdot 10^{-4}}{2} = 0,64 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$  – индуктивность силовой цепи преобразователя.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{\text{яц}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} = \frac{0,524 \cdot 10^{-3}}{29,86 \cdot 10^{-3}} = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (2.76)$$

Максимальное значение граничного тока зоны прерывистых токов для якорной цепи

$$I_{d\text{грмакс}} = \frac{1}{\omega_c} \cdot K_{\text{грмакс}} \cdot \frac{U_{\text{сф}}}{K_{u2} \cdot L_{\text{яц}}} = \frac{1}{3,14} \cdot 0,093 \cdot \frac{220}{0,428 \cdot 0,524 \cdot 10^{-3}} = 290,5 \text{ А},$$

$$\text{где } K_{\text{грмакс}} = 1 - \frac{\pi}{m_B} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m_B} = 1 - \frac{3,14}{6} \cdot \text{ctg} \frac{3,14}{6} = 0,093; \quad (2.77)$$

$K_{u2} = 0,428$  – расчетный коэффициент напряжения для трехфазной мостовой схемы.

В относительных единицах

$$\frac{I_{d\text{грмакс}}}{I_{\text{двн}}} = \frac{290,5}{1370} = 0,212. \quad (2.78)$$

Максимальная величина пульсаций тока двигателя при угле управления  $\alpha = 90^\circ$  и номинальном токе нагрузки в %

$$P(1)\% = \frac{E_{d(1)\text{макс}} \cdot 100}{m_B \cdot \omega_c \cdot I_{\text{н}} \cdot L_{\text{яц}}} = \frac{124,6 \cdot 100}{6 \cdot 314 \cdot 1370 \cdot 0,524 \cdot 10^{-3}} = 9,21\%, \quad (2.79)$$

$$\text{где } E_{d(1)\text{макс}} = \frac{U_{\text{сн}} \cdot \sqrt{2} \cdot m_B}{K_{u2} \cdot (m_B^2 - 1)} = \frac{220 \cdot \sqrt{2} \cdot 6}{0,48 \cdot (6^2 - 1)} = 124,6 \text{ В} - \text{действующее значение}$$

первой гармоники выпрямленного напряжения при угле управления  $\alpha = 90^\circ$ .

Полученные результаты можно считать удовлетворительными, поэтому сглаживающий реактор в цепь двигателя не устанавливаем.

Электромеханическая постоянная времени привода

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot R_{\text{яц}}}{(K \cdot \Phi_{\text{дв}})^2}. \quad (2.80)$$

При номинальном потоке возбуждения двигателя

$$T_{\text{м}} = \frac{(53,084 \div 56,17) \cdot 0,02986}{7,97^2} = (0,02495 \div 0,0264) \text{ с}, \quad (2.81)$$

при минимальном потоке возбуждения двигателя

$$T_m = \frac{(53,084 \div 56,17) \cdot 0,02986}{(126,7 \cdot 0,03145)^2} = (0,0998 \div 0,1056) \text{ с.} \quad (2.82)$$

## 2.6 Расчет параметров тиристорного возбудителя двигателя

Для регулирования скорости выше номинальной скорости двигателя ослаблением поля предусмотрен нереверсивный управляемый тиристорный возбудитель, выполненный по однофазной мостовой схеме выпрямления с нулевым вентилем.

Принципиальная электрическая схема тиристорного возбудителя двигателя подъемной лебедки приведена на рисунке 2.12.

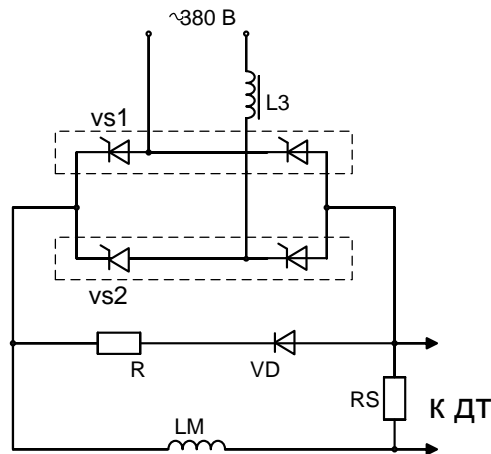


Рисунок 2.12 - Схема тиристорного возбудителя

Управляемый выпрямитель возбудителя выполнен по однофазной мостовой схеме выпрямления с нулевым вентилем. К однофазной сети возбудитель подключается через токоограничивающий реактор L3.

Номинальное напряжение обмотки возбуждения двигателя

$$U_{\text{вн}} = I_{\text{вн}} \cdot R_{\text{овгор}} = 22 \cdot 7,15 = 157,3 \text{ В.} \quad (2.83)$$

Требуемое напряжение однофазной сети

$$U_c = \frac{K_{u2} \cdot U_{\text{вн}}}{\cos \alpha_{\text{мин}}} = \frac{1,11 \cdot 157,3}{\cos 30^\circ} = 201,23 \text{ В.} \quad (2.84)$$

Для обеспечения коэффициента форсировки при восстановлении потока двигателя принимаем номинальное напряжение однофазной сети возбудителя

$$U_{\text{сн}} = U_{\text{л}} = 380 \text{ В.}$$

Необходимое значение сопротивления токоограничивающего реактора

$$Z_{\text{рз}} = \frac{U_{\text{кз}} \% \cdot U_{\text{сф}}}{100 \cdot I_{\text{фрасч}}} = \frac{5,5 \cdot 380}{100 \cdot 36,63} = 0,57 \text{ Ом,} \quad (2.85)$$

где  $I_{\text{фрасч}} = k_{i2\text{ф}} \cdot k_i \cdot \frac{I_{\text{двн}}}{2} = 1,11 \cdot 1,1 \cdot 30 = 36,63 \text{ А,} \quad (2.86)$

$I_{\text{дн}}$  - номинальный выпрямленный ток типового возбудителя;  $I_{\text{дн}} = 30 \text{ А}$

$U_{\text{сф}}$  - фазное напряжение питающей сети,  $U_{\text{сф}} = 380 \text{ В;}$

$U_{\text{кз}}$  - напряжение короткого замыкания реактора, принимаем  $U_{\text{кз}} = 5,5 \%$ .

Пренебрегая активным сопротивлением реактора  $R_{\text{р}} \approx 0$ , определим индуктивное сопротивление и индуктивность обмотки реактора

$$\begin{aligned} X_{\text{фрасч}} &= Z_{\text{фрасч}} = 0,02058 \text{ Ом,} \\ I_{\text{фрасч}} &= \frac{X_{\text{фрасч}}}{\omega_{\text{с}}} = \frac{0,02058}{314} = 6,55 \cdot 10^{-5} \text{ Гн,} \end{aligned} \quad (2.87)$$

где  $\omega_{\text{с}} = 2\pi \cdot f_{\text{с}} = 2 \cdot 3.14159 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.}$

Выбираем типовой блок возбудителя двигателя БВД - «04» с параметрами:

$I_{\text{дн}} = 30 \text{ А}$  – номинальный ток;

$U_{\text{упв макс}} = 10 \text{ В}$  – максимальное напряжение управления на входе возбудителя;

$\alpha_{\text{мин}} = 30^\circ$ ,  $\alpha_{\text{нач}} = 150^\circ$ ,  $\alpha_{\text{макс}} = 180^\circ$  – углы управления возбудителем.

Среднее значение ЭДС возбудителя при угле управления  $\alpha = 0^\circ$



$$E_{dov} = \frac{U_c}{K_{u2}} = \frac{380}{1,11} = 342 \text{ В.} \quad (2.88)$$

Максимальное значение коэффициента усиления тиристорного возбудителя

$$k_{\text{тпв макс}} = \frac{\pi \cdot E_{dov}}{U_{\text{упв макс}}} \cdot \frac{\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{мин}}}{180^\circ} = \frac{3,14 \cdot 342}{10} \cdot \frac{150^\circ - 30^\circ}{180^\circ} = 71,5. \quad (2.89)$$

Регулировочная характеристика возбудителя имеет вид (см. рисунок 2.13)

$$E_{\text{тпв}} = \frac{E_{dov}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha). \quad (2.90)$$

Постоянная времени тиристорного возбудителя

$$T_{\text{тпв}} = \frac{0,5}{m_B \cdot f_c} = \frac{0,5}{2 \cdot 50} = 0,005 \text{ с.} \quad (2.91)$$

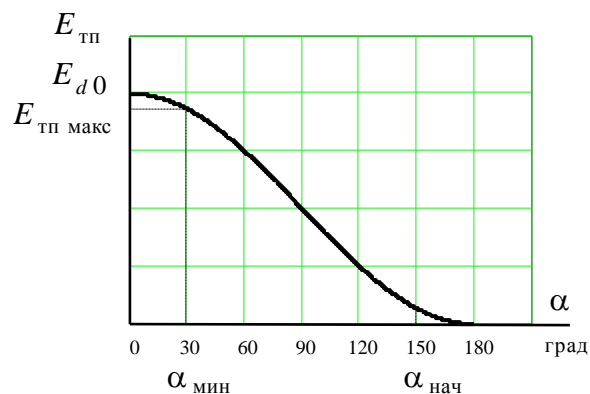


Рисунок 2.13 - Регулировочная характеристика возбудителя

Коэффициент передачи датчика тока возбуждения

$$K_{\text{дтв}} = \frac{U_{\text{дтв макс}}}{I_{\text{вн}}} = \frac{10}{30} = 0,333 \text{ В/А.} \quad (2.92)$$

## Расчет параметров цепи обмотки возбуждения двигателя

Сопротивление цепи обмотки возбуждения (активным сопротивлением цепи тиристорного возбудителя пренебрегаем)

$$R_{\text{цв}} = R_{\text{овгор}} + 0,1R_{\text{овгор}} = 7,15 + 0,1 \cdot 7,15 = 7,865 \text{ Ом.} \quad (2.93)$$

Постоянная времени основного потока обмотки возбуждения

$$T_{\text{в}} = \frac{L_{\text{ов}}}{R_{\text{цв}}} = \frac{5,12}{7,865} = 0,651 \text{ с,} \quad (2.94)$$

где  $L_{\text{ов}}$  принимаем равной  $L_{\text{ов}} = 5,12 \text{ Гн.}$

Постоянная времени потока рассеяния обмотки возбуждения

$$T_s = \frac{L_s + L_{\text{прасч}}}{R_{\text{цв}}} = \frac{0,7 + 0,131 \cdot 10^{-3}}{7,865} = 0,089 \text{ с,} \quad (2.95)$$

где  $L_{\text{прасч}} = 2 \cdot L_{\text{фрасч}} = 2 \cdot 0,0655 \cdot 10^{-3} = 0,131 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$  – индуктивность цепи возбудителя.

Постоянная времени контура вихревых токов

$$T_k \cong 0,1 \cdot T_{\text{в}} = 0,0651 \text{ Гн.} \quad (2.96)$$

Цепь обмотки возбуждения представим в виде передаточной функции

$$W(p) = \frac{1/R_{\text{цв}}}{(T_1 \cdot p + 1)(T_2 \cdot p + 1)} = \frac{1/7,865}{(0,7978p + 1) \cdot (0,00726p + 1)} = \frac{0,127}{0,00579p^2 + 0,80506p + 1},$$

$$\text{где } T_{1,2} = \frac{T_{\text{в}} + T_s + T_k}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_{\text{в}} + T_s + T_k}{2}\right)^2 - T_s \cdot T_k} \quad (2.97)$$

$$T_{1,2} = \frac{0,651 + 0,089 + 0,0651}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,651 + 0,089 + 0,0651}{2}\right)^2 - 0,089 \cdot 0,0651} =$$

$$= 0,40255 \pm 0,39529 \text{ с},$$

тогда  $T_1 = 0,797837 \text{ с},$

$$T_2 = 0,007262 \text{ с}. \quad (2.98)$$

## 2.7 Определение области допустимой работы электропривода подъемной лебедки

Максимальный допустимый ток двигателя:

при  $\Phi_{\text{дв}} = \Phi_{\text{двн}}$

$$I_{\text{двмакс}} = k_{\text{пер дв}} \cdot I_{\text{двн}} = 2,5 \cdot 1370 = 3425 \text{ А}, \quad (2.99)$$

где  $k_{\text{пер дв}}$  - коэффициент перегрузочной способности двигателя,  $k_{\text{пер дв}} = 2,5$ .

Максимальный допустимый ток преобразователя

$$I_{d \text{ макс}} = 3600 \text{ А}.$$

Принимаем при работе в первой зоне  $I_{\text{эпмакс}} = 3425 \text{ А}.$

Минимальный угол управления преобразователем якорной цепи при пониженном напряжении сети

$$\alpha_{\text{мин}} = \arccos \frac{C \cdot \omega_{\text{эпмакс}} + I_{\text{двн}} \cdot R_{\text{яц}}}{K_{\text{ис}} \cdot E_{d0}} = \arccos \frac{7,97 \cdot 52,36 + 1370 \cdot 0,02986}{0,9 \cdot 512,6} =$$

$$= \arccos(0,996279125) = 5,49354^\circ, \quad (2.100)$$

принимаем  $\alpha_{\text{мин}} = 6^\circ$ .

Предельная электромеханическая характеристика привода рассчитывается по выражению

$$\omega(I) = \frac{1}{K \cdot \Phi_{\text{двном}}} (K_{\text{ис}} \cdot E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\text{мин}} - I_{\text{дв}} \cdot R_{\text{яц}}) \quad (2.101)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета предельных характеристик электропривода

	$K_{uc} = 0,9$			
$\Phi_{дв} = 0,11 \text{ Вб}$	$I_{дв}, \text{ А}$	0	$I_{дв \text{ н}} = 1370 \text{ А}$	$I_{дв \text{ макс}} = 3425 \text{ А}$
	$\omega_{дв}, \text{ рад/с}$	57,63	52,48	44,75
	$K_{uc} = 1$			
$\Phi_{дв} = 0,11 \text{ Вб}$	$I_{дв}, \text{ А}$	0	$I_{дв \text{ н}} = 1370 \text{ А}$	$I_{дв \text{ макс}} = 3425 \text{ А}$
	$\omega_{дв}, \text{ рад/с}$	64,03	58,88	51,15
	$K_{uc} = 0,9$			
$\Phi_{дв} = 0,055 \text{ Вб}$	$I_{дв}, \text{ А}$	0	$I_{дв \text{ н}} = 1370 \text{ А}$	$I_{дв \text{ макс}} = 3425 \text{ А}$
	$\omega_{дв}, \text{ рад/с}$	115,25	104,95	89,5
	$K_{uc} = 1$			
$\Phi_{дв} = 0,055 \text{ Вб}$	$I_{дв}, \text{ А}$	0	$I_{дв \text{ н}} = 1370 \text{ А}$	$I_{дв \text{ макс}} = 3425 \text{ А}$
	$\omega_{дв}, \text{ рад/с}$	128,6	117,76	102,3

По данным таблицы 2.2 построены предельные характеристики электропривода подъемной лебедки, ограничивающие его область допустимой работы в 1 квадранте. Предельные характеристики электропривода подъемной лебедки приведены на рисунке 2.14.

Преобразователь электропривода подъемной лебедки нереверсивный, поэтому в инверторном режиме он может обеспечить работу привода в 4 квадранте при активной нагрузке на валу двигателя. Нагрузка механизма подъемной лебедки реактивная по характеру, поэтому работа привода возможна только в 1 квадранте.

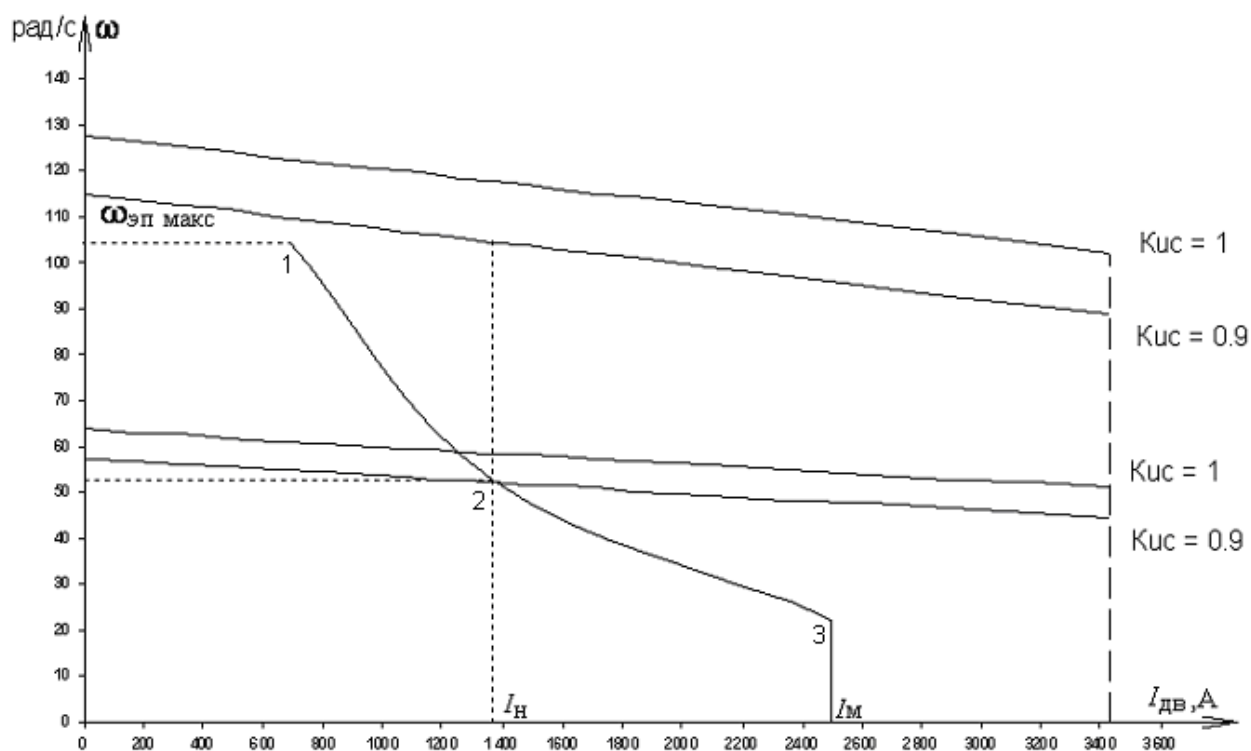


Рисунок 2.14 - Область допустимой работы электропривода подъемной лебедки

На рисунке 2.14 в области работы электропривода нанесена предельная характеристика 1-2-3, учитывающая допустимые нагрузки механизма подъемной лебедки. Характеристика 1-2-3 полностью располагается в области допустимой работы электропривода, что гарантирует возможность привода обеспечить требуемые предельные нагрузки механизма подъемной лебедки.

С использованием прикладной программы РТОК рассчитаны электромеханические характеристики системы ТПЯ – Д (см. рисунок 2.15).

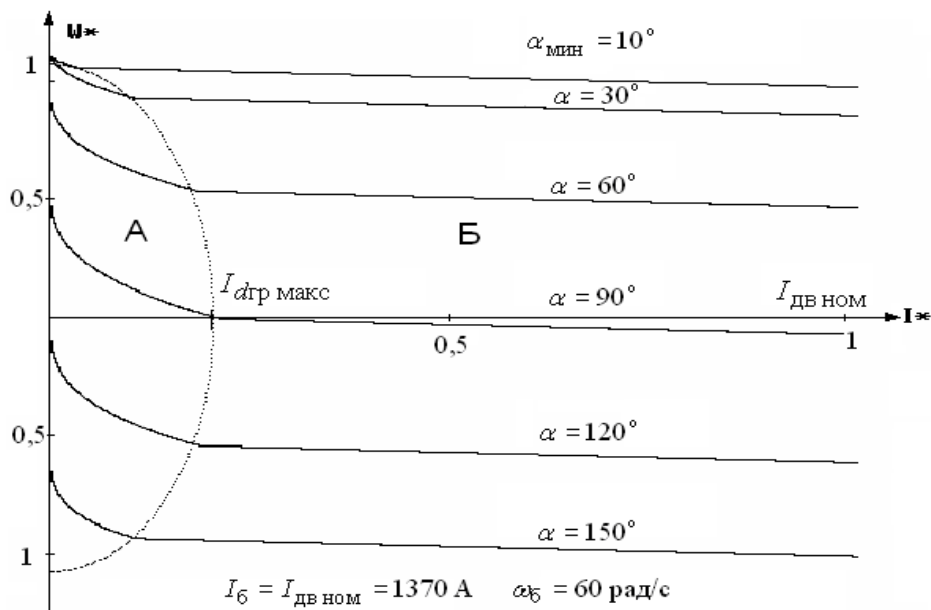


Рисунок 2.15 – Электромеханические характеристики системы ТПЯ – Д:  
А – область прерывистого тока; Б – область непрерывного тока

### Протокол программы РТОК

Введите эквивалентную индуктивность якорной цепи ,Гн	0.000524
Введите эквивалентное сопротивление якорной цепи ,Ом	0.02986
Введите сопротивление , вносимое за счет коммутации анодных токов $R_k$	,Ом 0.0192
Введите число фаз выпрямителя	6
Введите действующее значение э.д.с источника переменного тока $E_2$ , В	380
Введите среднее значение выпрямленной э.д.с $E_{до}$ , В	512
Введите постоянную э.д.с. двигателя , В*с/рад	7.97

Анализ характеристики показывает, что максимальное значение граничного тока зоны прерывистых токов якорной цепи в о.е. не превышает

$$\frac{I_{дгр\max}}{I_{двн}} = \frac{290}{1370} = 0,212, \text{ что совпадает с результатами аналитического расчета и}$$

является приемлемым для данного типа двигателя.

## 2.8 Структурная схема силового канала электропривода подъемной лебедки

Структурная схема силового канала электропривода приведена на рисунке 2.16. Параметры элементов силового канала сведены в таблицу 3.

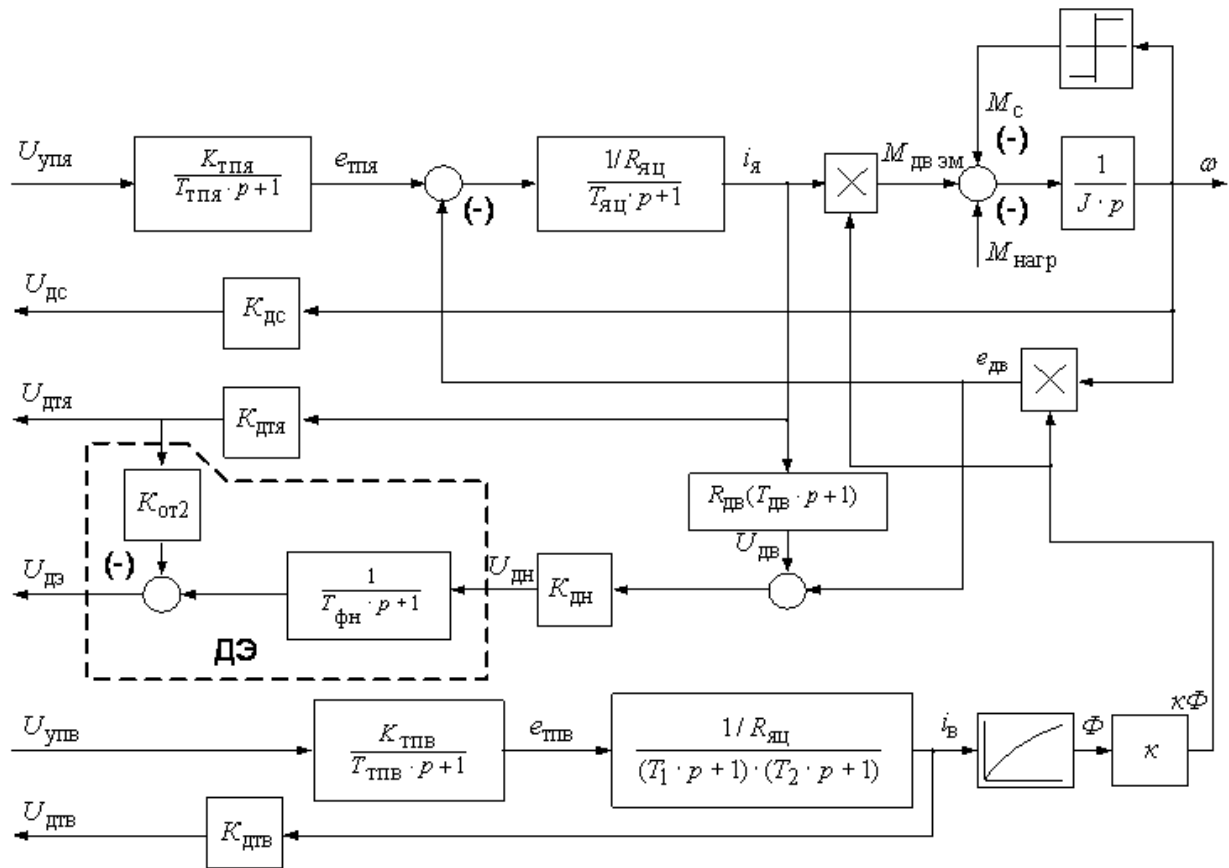


Рисунок 2.16 – Структурная схема силового канала электропривода подъемной лебедки

Коэффициент передачи датчика тока якоря

$$K_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{тмакс}}}{I_{\text{ямакс}}} = \frac{10}{3000} = 0,00333 \text{ В/А}. \quad (2.102)$$

Коэффициент передачи датчика скорости (тахогенератора)

$$K_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{тг}}}{\omega_{\text{тг}}} = \frac{33}{104,72} = 0,315 \text{ В} \cdot \text{с/рад}. \quad (2.103)$$

Коэффициент передачи датчика напряжения

$$K_{\text{дн}} = \frac{U_{\text{дн макс}}}{U_{\text{макс}}} = \frac{10}{500} = 0,02. \quad (2.104)$$

Коэффициент обратной связи по току датчика ЭДС двигателя ДЭ

$$K_{от2} = R_{дв} \cdot \frac{K_{дн}}{K_{дтj}} = 0,0166 \cdot \frac{0,02}{0,0033} = 0,1. \quad (2.105)$$

При наладке электропривода в цепи датчика напряжения может быть установлен фильтр с постоянной времени  $T_{фн} = T_{дв} = 0,0277$  с.

Коэффициент передачи датчика тока возбуждения

$$K_{дтв} = \frac{U_{дтв \text{ макс}}}{I_{в \text{ макс}}} = \frac{10}{30} = 0,333 \text{ В/А} . \quad (2.106)$$

Параметры элементов силового канала сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры элементов силового канала

$K_{тjя}$	$T_{тjя}, \text{с}$	$R_{яц}, \text{Ом}$	$T_{яц}, \text{с}$	$L_{яц}, \text{Гн}$	$C$	$J_э, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
98,412	0,00167	0,02986	0,0175	0,000524	7,97	$53,084 \div 56,17$
$T_{дв}, \text{с}$	$L_{дв}, \text{Гн}$	$K_{дс}$	$K_{дтj}, \text{В/А}$	$K_{дн}$	$K_{от2}$	$T_{фн}, \text{с}$
0,0277	0,00046	0,315	0,00333	0,02	0,1	0,0277
$K_{тпе}$	$T_{тпе}, \text{с}$	$R_{цв}, \text{Ом}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$K$	$M_c, \text{Н} \cdot \text{м}$
71,52	0,005	7,865	0,7978	0,0007262	126,7	1560,6
$M_{нагр}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$K_{дте}, \text{В/А}$	$R_{двгор}, \text{Ом}$				
$5447,8 \div 10895,6$	0,333	0,0166				

### 3 ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ

#### 3.1 Функциональная схема электропривода подъемной лебедки

Функциональная схема электропривода подъемной лебедки приведена на рисунке 3.1. Основные функциональные устройства электропривода лебедки:

МЛ – электродвигатель лебедки;



ТПЯ – тиристорный преобразователь цепи якоря двигателя;

ОВМ – обмотка возбуждения двигателя;

САР « $n_{\text{дв}}$ » – система автоматического управления скоростью двигателя;

САР « $E_{\text{дв}}$ » – система автоматического регулирования ЭДС двигателя;

ВР – тахогенератор, установленный на валу двигателя лебедки;

СК – сельсинный командоаппарат;

ДВ – датчик веса бурильной колонны.

Устройства САР электропривода лебедки находятся в блоке регуляторов лебедки (БРЛ) и в блоке возбуждения БВД. В блоке регуляторов БРЛ расположены следующие узлы:

ФВУ – фазочувствительное выпрямительное устройство;

ЗИ – задатчик интенсивности;

РМЛ – регулятор мощности подъемной лебедки;

УН – узел нелинейности в канале управления от датчика веса;

РС – пропорциональный регулятор скорости;

РТЯ – пропорционально-интегральный регулятор тока;

УКС – узел контроля скорости;

ДЭ – датчик ЭДС двигателя;

УВМ – устройство выделения модуля;

РЭВ – интегральный регулятор ЭДС двигателя по каналу возбуждения;

ДТЯ – датчик тока якоря двигателя;

ДН – датчик напряжения.

В блоке возбуждения БВД расположены следующие функциональные узлы:

ДТВ – датчик тока возбуждения;

РТВ – пропорционально-интегральный регулятор тока возбуждения;

ТПВ – однофазный тиристорный преобразователь обмотки возбуждения.

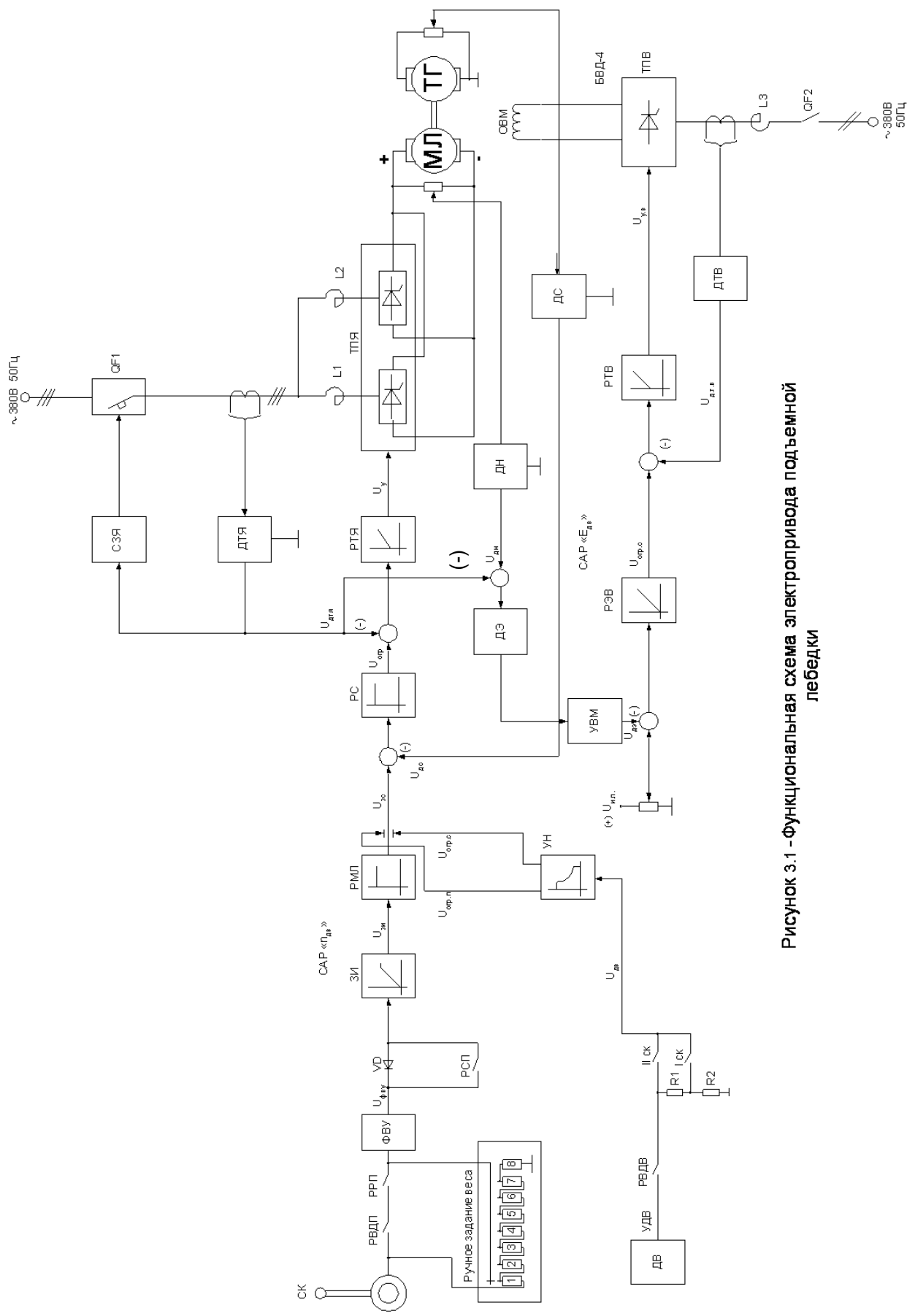


Рисунок 3.1 - Функциональная схема электропривода подъемной лебедки

Электропривод буровой лебедки выполнен по системе ТП-Д постоянного тока. САР электропривода выполнена как система двухзонного регулирования скорости и состоит из нереверсивных систем управления напряжением якоря  $U_{\text{дв}}$  (САР скорости) и управления током  $I_{\text{в}}$  и потоком  $\Phi_{\text{дв}}$  возбуждения двигателя (САР ЭДС). Применена схема с зависимым регулированием ЭДС двигателя.

Управление скоростью двигателя в первой зоне при постоянном потоке возбуждения осуществляется двухконтурной системой регулирования с регуляторами скорости РС и тока якоря РТЯ и обратными связями по скорости (от тахогенератора ВР) и току двигателя (от датчика тока ДТЯ). Скорость задается сельсинным командоаппаратом СК.

Входная цепь РС настраивается таким образом, что номинальные значения напряжения двигателя  $U_{\text{двн}}$ , ЭДС двигателя  $E_{\text{дв}}$  и скорости вращения  $n_{\text{дв}}$  достигаются при среднем положении рукоятки СК, когда  $U_{\text{зс}} = 0,5 \cdot U_{\text{зсмакс}} = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ В}$ .

Дальнейший рост сигнала  $U_{\text{зс}}$  приводит к увеличению скорости привода за счет уменьшения тока возбуждения (2-я зона регулирования). Система регулирования (стабилизации) ЭДС двигателя, в состав которой входят регуляторы РЭВ и РТВ, действует следующим образом.

На вход РЭВ подается постоянный сигнал задания  $U_{\text{зз}}$ , соответствующий номинальному значению  $E_{\text{двн}}$ . На второй вход РЭВ подается сигнал отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя  $U_{\text{дэ}}$ . Сигнал  $U_{\text{дэ}}$ , пропорциональный ЭДС двигателя, получается как разность сигналов датчиков напряжения ДН и тока якоря ДТЯ.

В первой зоне сигнал на выходе РЭВ максимальный и равен уставке узла ограничения (регулятор находится в зоне насыщения), в результате чего ток возбуждения остается постоянным и равным номинальному.

При  $U_{зс} = 5 \text{ В}$  скорость двигателя и ЭДС достигают номинальных значений, РЭВ выходит из зоны насыщения и уменьшает задание на ток возбуждения  $U_{зТВ}$ . Начинается регулирование потока двигателя таким образом, что

$$E_{дв} = K \cdot \Phi_{дв} \cdot \omega_{дв} = E_{двн}. \quad (3.1)$$

Теперь рост скорости вращения двигателя при практически постоянном значении напряжения на двигателе  $U_{дв}$  и ЭДС двигателя  $E_{дв}$  достигается за счет ослабления поля

$$\Phi_{дв} = \Phi_{двн} \cdot \frac{\omega_{двн}}{\omega_{дв}}. \quad (3.2)$$

Отметим, что при работе двигателя с номинальным током, это приводит к уменьшению момента двигателя

$$M_{дв} = I_{дв} \cdot \Phi_{дв}. \quad (3.3)$$

Таким образом, управление возбуждением является зависимым от управления каналом регулирования напряжения якоря, причем сигнал обратной связи по ЭДС является связующим сигналом, обеспечивающим согласование действия обоих каналов управления.

Примененная схема регулирования обеспечивает линейную зависимость скорости электропривода от задающего напряжения  $U_{зс}$  (см. рисунок 3.2).

В структуре лебедки имеется устройство автоматического ограничения максимальной скорости подъема в зависимости от веса на крюке таким образом, чтобы мощность, развиваемая приводом, оставалась постоянной и равной номинальной  $P_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_{двмакс} = P_{двн}$ .

В состав устройства входят:

- П-РМЛ – пропорциональный регулятор мощности с коэффициентом передачи  $K_{рмл} = 1$ ;

- ДВ – датчик веса и делитель с коэффициентом передачи 1 на второй и 0,5 на первой скорости лебедки;
- УН – узел нелинейный, формирующий уровень ограничения выходного напряжения регулятора РМЛ  $U_{\text{рмл}} = U_{\text{зс}}$ .

Характеристика УН приведена на рисунке 3.3.

Настройка контура тока производится таким образом, чтобы максимальный ток стопорения двигателя был равен 2500А, что при работе на первой скорости лебедки обеспечивает максимальное допустимое усилие на крюке 200 кН.

Настройка контура скорости проводится таким образом, чтобы при  $U_{\text{зсмакс}} = 10 \text{ В}$  электропривод обеспечивал максимальную скорость  $n_{\text{эпмакс}} = 1000 \text{ об/мин}$ .

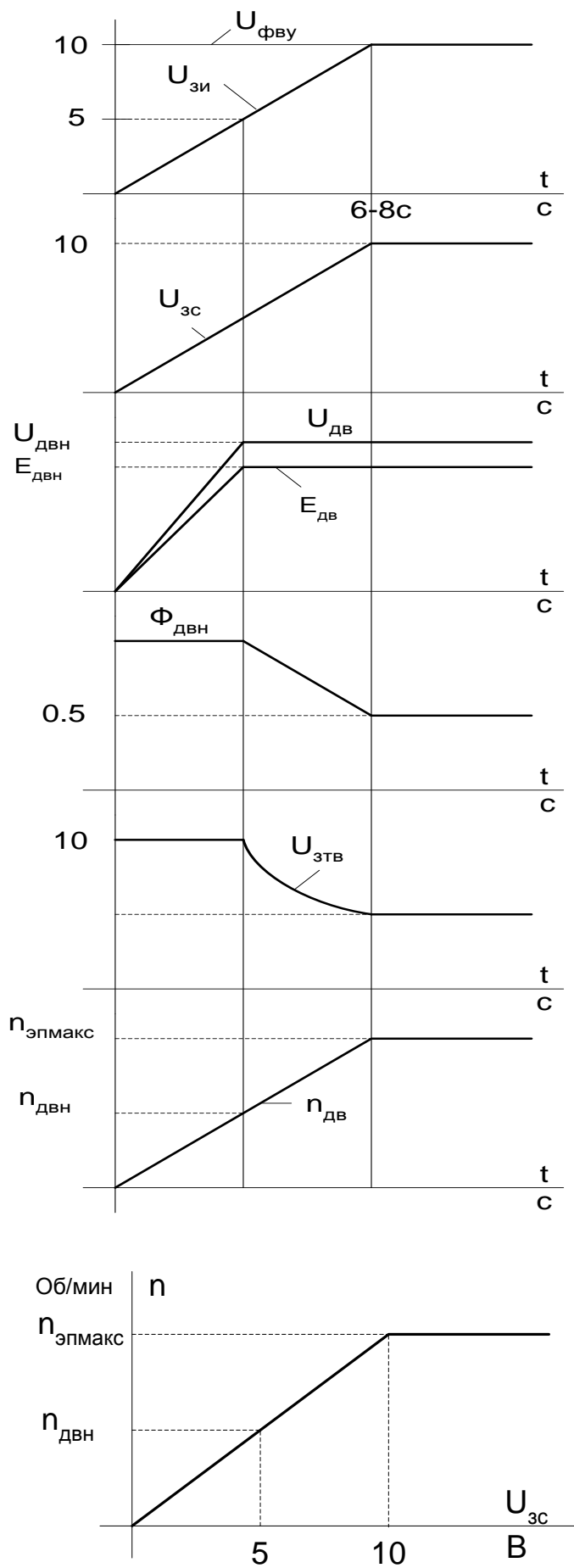


Рисунок 3.2 - Диаграммы, поясняющие принцип работы САР электропривода лебедки

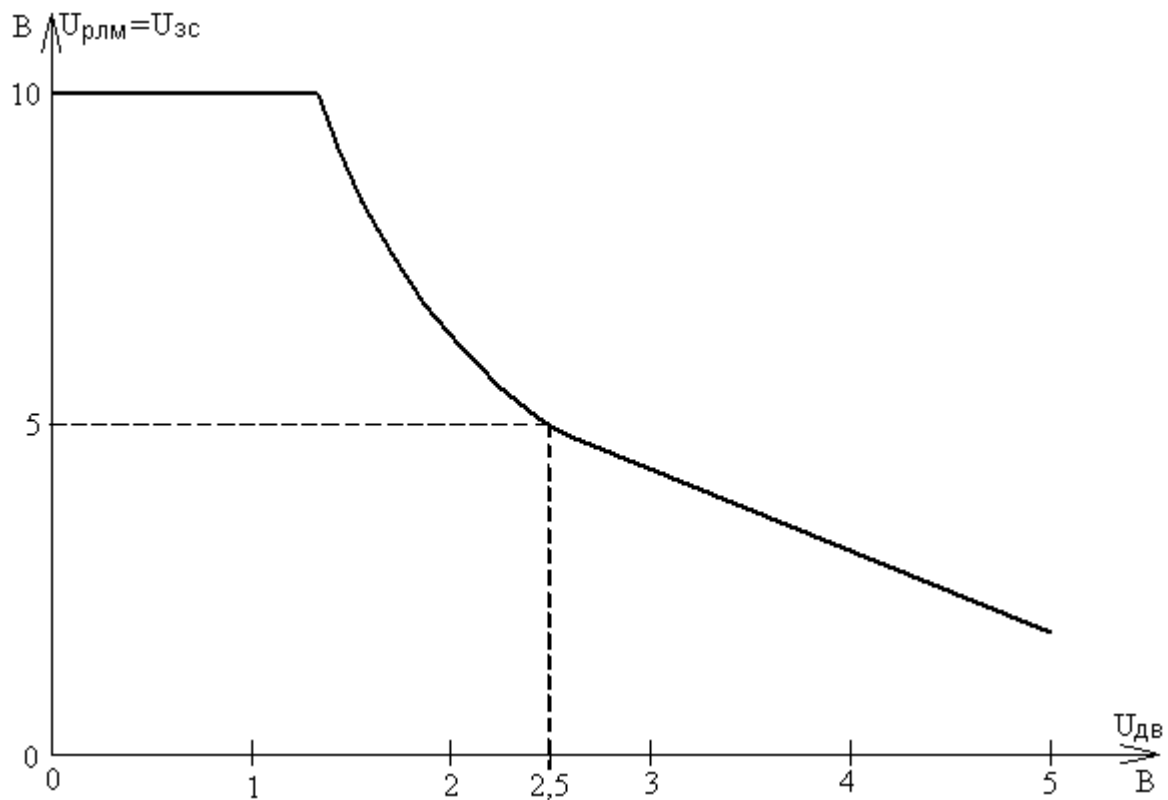


Рисунок 3.3 – Характеристика нелинейного узла

### 3.2 Структурная схема САР скорости электропривода подъемной лебедки

Структурная схема линейризованной САР скорости электропривода подъемной лебедки приведена на рисунке 3.4.

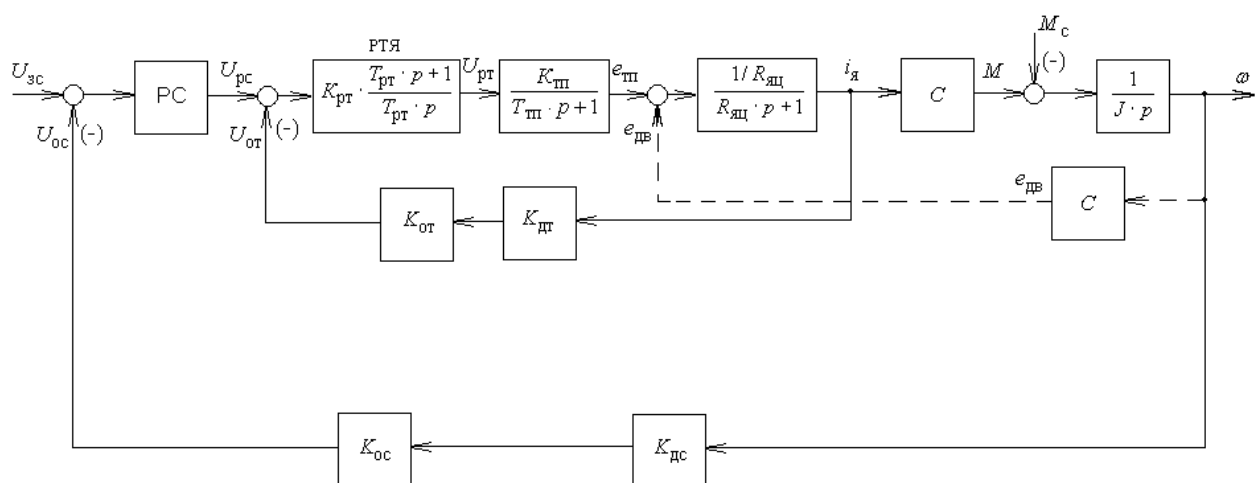


Рисунок 3.4 – Структурная схема САР скорости электродвигателя привода  
подъемной лебедки

На схеме приняты следующие обозначения:

РС – регулятор скорости;

РТЯ – регулятор тока якорной цепи;

$K_{от}$ ,  $K_{дт}$  – коэффициенты передачи входной цепи обратной связи РТ;

$K_{ос}$ ,  $K_{дс}$  – коэффициенты входной цепи обратной связи регулятора и передачи датчика скорости.

САР скорости реализована как двухконтурная с внутренним контуром тока якоря и внешним контуром скорости.

Оптимизация САР скорости электропривода сводится к определению типа регуляторов, определения параметров регуляторов и цепей обратных связей, обеспечивающих технически оптимальные переходные процессы.

Оптимизация проводится в два этапа:

- первый этап – аналитический для линеаризованной системы регулирования;
- второй этап – метод имитационного моделирования с учетом влияния ЭДС двигателя и основных нелинейностей электропривода.

### **3.3 Оптимизация контура тока якоря**

Оптимизацию контура тока осуществляем без учета отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя, что соответствует режиму работы с заторможенным двигателем. Структурная схема приведена на рисунке 3.5, где пунктирной линией показана неучтенная обратная связь по ЭДС двигателя.



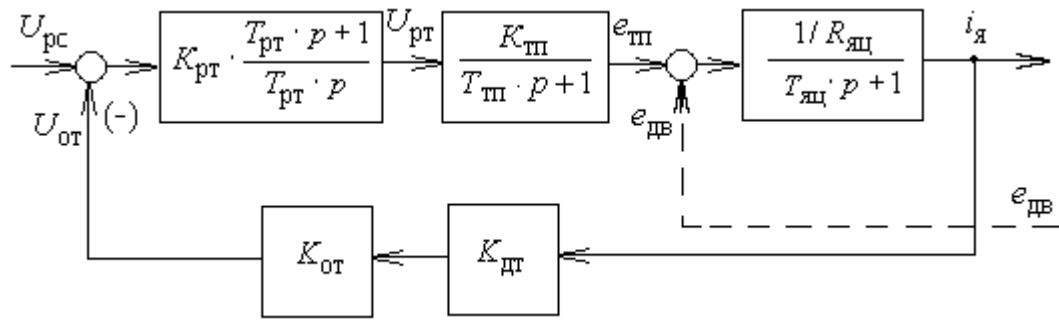


Рисунок 3.5 - Структурная схема контура тока

Контур содержит два инерционных звена первого порядка с постоянными времени  $T_{яц} = 17,5 \cdot 10^{-3}$  с и  $T_{тп} = 1,67 \cdot 10^{-3}$  с. (3.4)

Отношение  $T_{яц} / T_{тп} = \frac{17,5 \cdot 10^{-3}}{1,67 \cdot 10^{-3}} = 10,47$  значительно больше единицы,

следовательно, принимаем:

- $T_{\mu r} = T_{тп} = 0,00167$  с – малая постоянная времени контура;
- $T_{яц} = 0,0175$  с – большая постоянная контура, которую следует компенсировать.

Контур тока настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W(p)_{рт} = K_{рт} \cdot \frac{T_{рт} \cdot p + 1}{T_{рт} \cdot p}, \quad (3.5)$$

где  $T_{рт} = T_{яц} = 0,0175$  с – постоянная времени регулятора;

$$K_{рт} = \frac{R_{яц} \cdot T_{яц}}{K_{тп} \cdot K_{т} \cdot a_{т} \cdot T_{\mu r}} = \frac{0,02986 \cdot 0,0175}{98,412 \cdot 0,004 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 0,3974 \quad (3.6)$$

– коэффициент усиления регулятора;

$$K_{т} = \frac{U_{зт\max}}{I_{эп\max}} = \frac{10}{2500} = 0,004 \text{ В/А} \text{ – коэффициент обратной связи по току;}$$

$a_T = 2$  – коэффициент оптимизации контура тока по МО.

Коэффициент передачи входной цепи обратной связи РТ

$$K_{от} = \frac{K_T}{K_{дт}} = \frac{0,004}{0,0033} = 1,21. \quad (3.7)$$

Влияние ЭДС двигателя на работу контура тока оценивается отношением постоянных времени

$$\frac{T_M}{T_{яц}} = \frac{23,50 \cdot 10^{-3}}{17,5 \cdot 10^{-3}} = 1,3428. \quad (3.8)$$

Отношение электрохимической постоянной времени к постоянной времени якорной цепи меньше четырех, что приводит к существенному влиянию ЭДС двигателя на процессы в контуре тока и скорости.

Передаточная функция разомкнутого контура тока

Передаточная функция замкнутого контура тока

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{траз}} &= \frac{1/K_T}{a_T \cdot T_{\mu T} \cdot p(T_{\mu T} \cdot p + 1) + 1} = \frac{1/K_T}{a_T \cdot T_{\mu T}^2 \cdot p^2 + aT_{\mu T} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{160}{5,57 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0,0034 p + 1}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\delta = 4,3\%$  - перерегулирование;

$t_{py1}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00167 = 0,006847$  с – время первого вхождения в 5% зону;

$t_{py2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu T} = 4,1 \cdot 0,00167 = 0,006847$  с – время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 0,71/T_{\mu T} = 0,71/0,00167 = 425,15$  рад/с – полоса пропускания по модулю и фазе

$$\text{или } f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{425,15}{2 \cdot 3,14} = 67,7 \text{ Гц};$$

$\Delta I_{y.уст} = 0$  – установившаяся ошибка обработки входного воздействия.

### 3.4 Оптимизация контура скорости

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 3.6. Контур содержит интегрирующее звено, описывающее одномассовую механическую систему, и колебательное звено второго порядка, представляющее собой оптимизированный замкнутый контур тока.

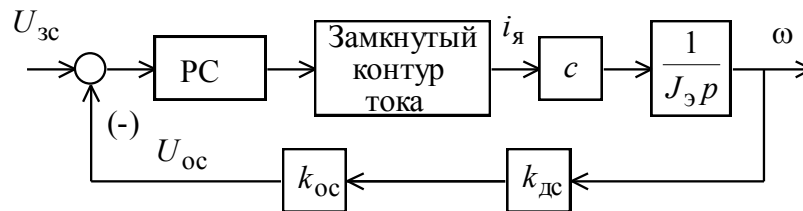


Рисунок 3.6 - Структурная схема контура скорости

Контур оптимизируется по МО. Малая постоянная времени контура выбирается равной  $T_{\mu c} = a_T \cdot T_{\mu T}$ . Принимаем П-регулятор скорости  $W_{pc}(p) = K_{pc}$  с коэффициентом усиления

$$\begin{aligned} K_{pc} &= \frac{(J_{\text{эмин}} \div J_{\text{эмакс}}) \cdot K_T}{C \cdot K_c} \cdot \frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T}} = \\ &= \frac{(50,59 \div 61,31) \cdot 0,004}{7,93 \cdot 0,095} \cdot \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 0,00167} = \frac{(0,20236 \div 0,24524)}{0,75335} \cdot 149,7 = \\ &= (40,21 \div 48,73), \end{aligned} \quad (3.10)$$

где  $K_c = \frac{U_{\text{зсмакс}}}{\omega_{\text{эпмакс}}} = \frac{10}{104,7} = 0,095 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$  – коэффициент обратной связи по скорости;

$U_{\text{зсмакс}} = 10 \text{ В}$  – максимальное значение напряжения задания

$a_c = 2$  – коэффициент оптимизации контура по МО.

Коэффициент входной цепи обратной связи регулятора

$$K_{oc} = \frac{K_c}{K_{дс}} = \frac{0,095}{0,315} = 0,3, \quad (3.11)$$

где  $K_{дс} = 0,315 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$  – коэффициент датчика скорости (тахогенератора).

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{сраз}} &= \frac{1}{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu\Gamma} \cdot p [a_T \cdot T_{\mu\Gamma} \cdot p (T_{\mu\Gamma} \cdot p + 1) + 1]} = \\ &= \frac{1}{4 \cdot 0,00167 \cdot p [2 \cdot 0,00167 \cdot p (0,00167 \cdot p + 1) + 1]} = \\ &= \frac{1}{3,7 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 22,3 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 6,68 \cdot 10^{-3} \cdot p}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$\begin{aligned} W(p)_{\text{сзам}} &= \frac{1/K_c}{a_c \cdot a_T^2 \cdot T_{\mu\Gamma}^3 \cdot p^3 + a_c \cdot a_T^2 \cdot T_{\mu\Gamma}^2 \cdot p^2 + a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu\Gamma} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1/0,095}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,00167^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,00167^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,00167 \cdot p + 1} = \\ &= \frac{10,526}{3,7 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 22,3 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 66,8 \cdot 10^{-4} \cdot p + 1}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Показатели качества работы контура скорости по управлению:

–  $\delta = 8,1\%$  – перерегулирование;

–  $t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,0117 \text{ с}$  – время первого согласования;

–  $t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,02 \text{ с}$  – время переходного процесса при отработке

ступенчатого входного воздействия;

–  $\omega_{\Pi}^{(м)} = \frac{0,5}{T_{\mu\Gamma}} = 299,4 \text{ рад/с}$  или  $f_{\Pi}^{(м)} = \frac{\omega_{\Pi}}{2\pi} = \frac{299,4}{2 \cdot 3,14} = 47,675 \text{ Гц}$  – полоса

пропускания контура по модулю;

$$- \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu T}} = 209,58 \text{ рад/с} \quad \text{или} \quad f_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{\omega_{\Pi}^{(\Phi)}}{2\pi} = \frac{209,58}{2 \cdot 3,14} = 33,372 \text{ Гц} \quad -$$

полоса пропуск контура по фазе;

-  $\Delta\omega_{y.уст} = 0$  - установившаяся ошибка при отработке управляющего воздействия.

Показатели качества работы контура скорости по возмущению:

$$\Delta\omega_{вуст} = \frac{a_c \cdot a_T \cdot T_{\mu T}}{J_{\Sigma}} \cdot \Delta M_c = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,00167}{(53,084 \div 56,17)} \cdot 10695,187 = (1,346 \div 1,272) \text{ рад/с}$$

(3.14) - установившаяся ошибка при отработке возмущающего воздействия;

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{вуст} &= 0,37(1 + 0,95 \cdot a_c) \cdot \frac{2 \cdot a_T \cdot T_{\mu T}}{J_{\Sigma}} \cdot \Delta M_c = \\ &= 0,37 \cdot (1 + 0,95 \cdot 2) \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,00167}{(53,084 \div 56,17)} \cdot 10695,187 = (1,444 \div 56,17) \text{ рад/с} \end{aligned} \quad (3.15)$$

- максимальный провал (всплеск) скорости двигателя при набросе (сбросе) нагрузки.

С использованием прикладной программы LACH рассчитаны логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) разомкнутого (рисунок 3.7) и замкнутого (рисунок 3.8) контура скорости.

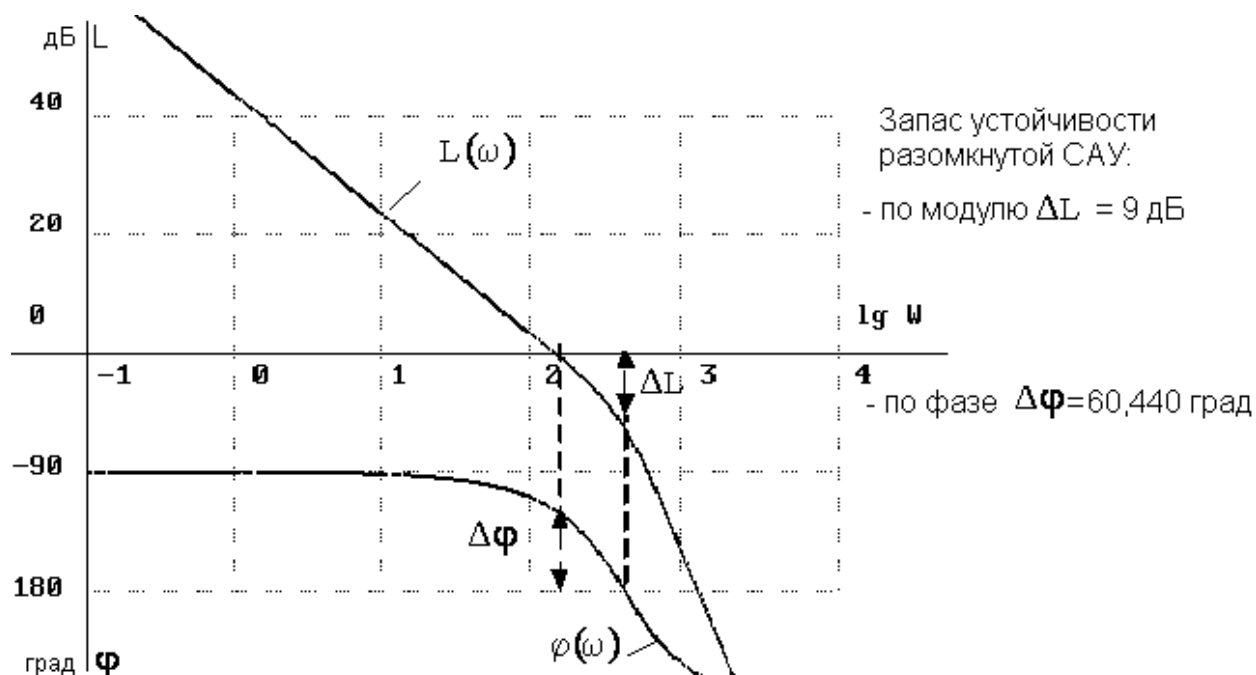


Рисунок 3.7 – ЛЧХ разомкнутого контура скорости

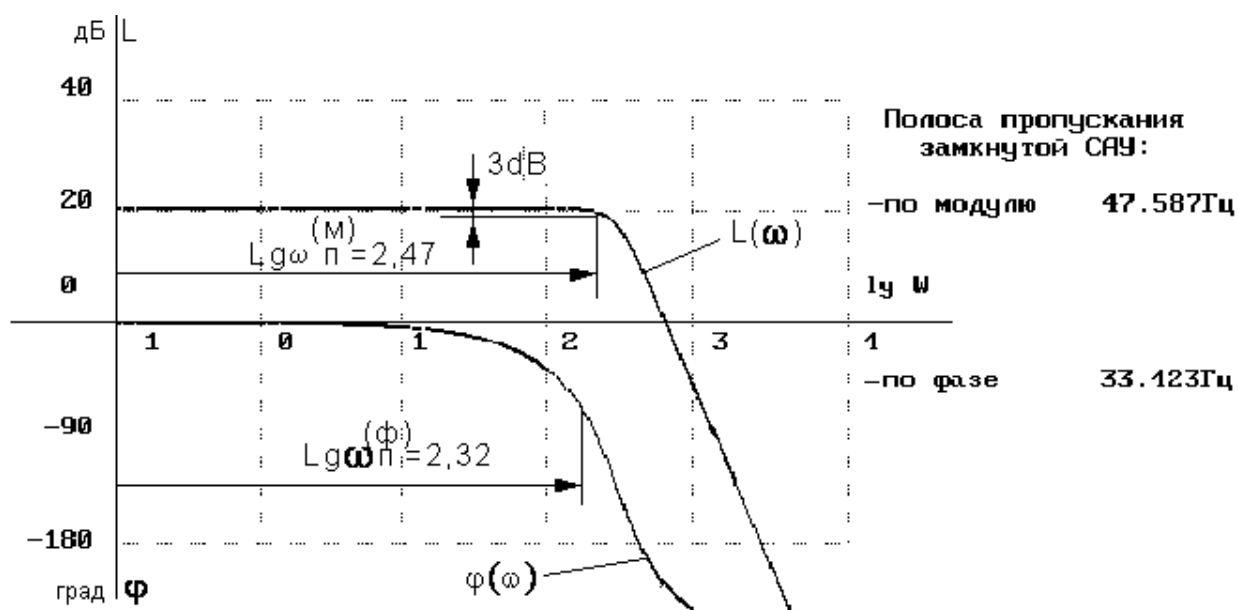


Рисунок 3.8 – ЛЧХ замкнутого контура скорости

### 3.5 Структурная схема САУ ЭДС двигателя

Структурная схема САУ ЭДС двигателя приведена на рисунке 3.9. На схеме приняты следующие обозначения:

РТВ – регулятор тока возбуждения двигателя;

$K_{\text{отв}}$  – коэффициент передачи входной цепи регулятора обратной связи регулятора тока;

$K_{\text{дтв}}$  – коэффициент передачи датчика тока;

РЭ – регулятор ЭДС.

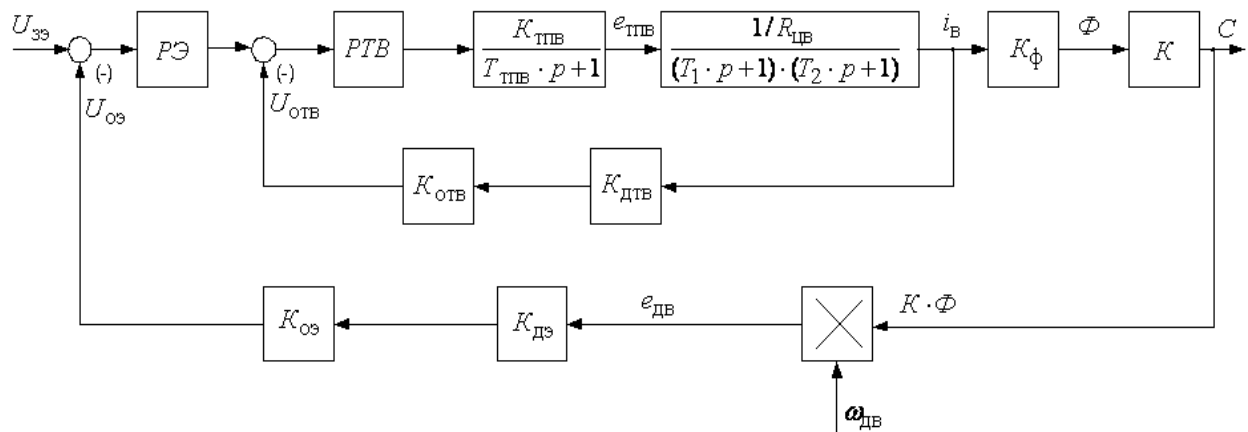


Рисунок 3.9 – Структурная схема САР ЭДС электродвигателя привода подъемной лебедки

САР ЭДС двигателя электропривода подъемной лебедки реализована как двухконтурная с внутренним контуром тока возбуждения и внешним контуром ЭДС двигателя. Формирование сигнала обратной связи по ЭДС двигателя осуществляется суммированием входных сигналов, пропорциональных напряжению двигателя и падению напряжения в якорной цепи (току якорной цепи). Суммирование сигналов производится непосредственно на входе регулятора ЭДС, на вход которого подаётся две обратных связи: отрицательная обратная связь по напряжению двигателя и положительная обратная связь по току якорной цепи.

Входной фильтр на входе контура ЭДС и фильтр в цепи обратной связи по напряжению могут быть установлены при необходимости.

САР ЭДС двигателя представляет собой двухконтурную систему регулирования потока возбуждения. Задание на ток возбуждения на входе контура формируется в зависимости от положения сельсинного командоаппарата СК.

Контур тока возбуждения стабилизирует ток возбуждения двигателя при колебаниях напряжения сети и ослабляет поток двигателя при  $U_{zc} > 5$  В.

### 3.6 Оптимизация контура тока возбуждения двигателя

Структурная схема контура тока возбуждения приведена на рисунке 3.10.

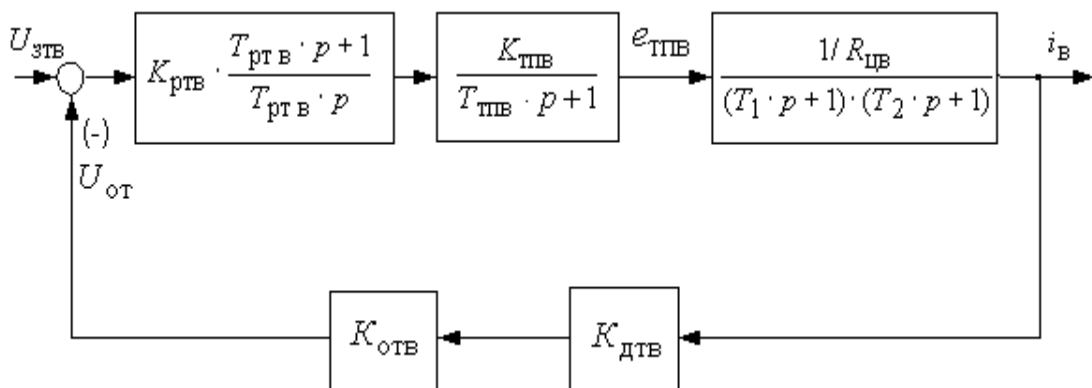


Рисунок 3.10 – Структурная схема контура тока возбуждения двигателя.

Контур содержит три инерционных звена первого порядка (апериодических), при этом имеет место следующее соотношение постоянных времени

$$T_1 \gg (T_{тпв} + T_2). \quad (3.16)$$

Поэтому за малую постоянную времени контура примем

$$T_{\mu тв} = (T_{тпв} + T_2) = 0,005 + 0,007262 = 0,0012262 \text{ с}, \quad (3.17)$$

$T_1 = 0,797837$  с будем считать большой постоянной времени контура.

Оптимизация контура по МО достигается при выборе ПИ-РТВ с передаточной функцией  $U_{зТВ}$

$$W_{рТВ}(p) = K_{рТВ} \cdot \frac{T_{рТВ} \cdot p + 1}{T_{рТВ} \cdot p},$$

$$\text{где } K_{рТВ} = \frac{R_{цв} \cdot T_1}{K_{тпв} \cdot K_{тв} \cdot \alpha_{тв} \cdot T_{\mu тв}} = \frac{7,865 \cdot 0,797837}{71,52 \cdot 0,45 \cdot 2 \cdot 0,0012262} = 7,955 \quad (3.18)$$



– коэффициент усиления регулятора;

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{U_{\text{зТВмакс}}}{I_{\text{ВН}}} = \frac{10}{22} = 0,45 \text{ В/А} \text{ – коэффициент обратной связи по току}$$

возбуждения;

$a_{\text{ТВ}} = 2$  – коэффициент оптимизации по МО;

$T_{\text{рТВ}} = T_1 = 0,798 \text{ с}$  – постоянная времени регулятора.

Коэффициент передачи входной цепи обратной связи РТВ

$$K_{\text{отв}} = \frac{K_{\text{ТВ}}}{K_{\text{дТВ}}} = \frac{0,45}{0,333} = 1,351. \quad (3.19)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения

$$\begin{aligned} W_{\text{ТВзам}}(p) &= \frac{\frac{1}{K_{\text{ТВ}}}}{\alpha_{\text{ТВ}} \cdot T_{\text{мТВ}}^2 \cdot p^2 + \alpha_{\text{ТВ}} \cdot T_{\text{мТВ}} \cdot p + 1} = \\ &= \frac{1/0,45}{2 \cdot 0,012262^2 p^2 + 2 \cdot 0,012262 \cdot p + 1} = \frac{2,222}{0,0003 \cdot p^2 + 0,0245 \cdot p + 1}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Показатели качества работы контура:

–  $\delta = 4,3\%$  – перерегулирование;

–  $t_{\text{py1}}^{(5)} = t_{\text{py2}}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\text{мТВ}} = 4,1 \cdot 0,012262 = 0,05 \text{ с}$  – время переходного

процесса;

$$- \omega_{\text{п}}^{(\phi)} = \omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot T_{\text{мТВ}}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 0,012262} = 57,667 \text{ рад/с}$$

$$\text{или } f_{\text{п}}^{(\phi)} = f_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{\omega_{\text{п}}}{2 \cdot \pi} = \frac{57,667}{2 \cdot 3,14} = 9,18 \text{ Гц} \text{ – полоса пропускания;}$$

–  $\Delta I_{\text{уст}} = 0$  – установившаяся ошибка отработки заданного значения тока возбуждения.

### 3.7 Оптимизация контура ЭДС

Структурная схема контура приведена на рисунке 3.11, где внутренний оптимизированный контур тока возбуждения представлен апериодическим звеном с усеченной до первого порядка передаточной функцией

$$W(p)_{\text{ТВ зам}} = \frac{1/K_{\text{ТВ}}}{T_{\text{ТВ}} \cdot p + 1}, \quad (3.21)$$

где  $T_{\text{ТВ}} = 2 \cdot T_{\mu\text{ТВ}} = 0,0245$  с.

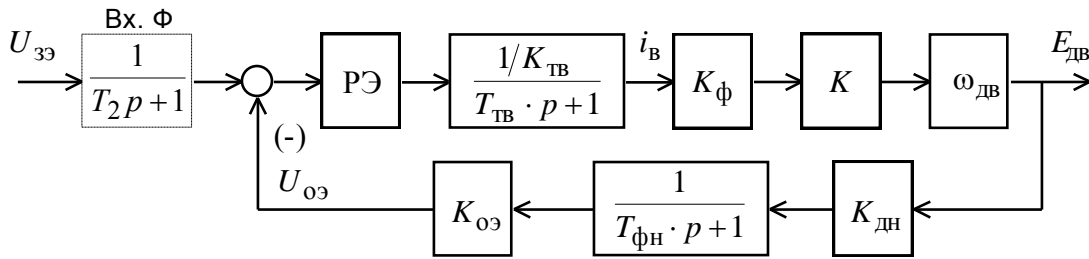


Рисунок 3.11 – Структурная схема контура ЭДС

Оптимизацию контура ЭДС двигателя во второй зоне регулирования осуществим при допущении  $K_{\text{дн}} = K_{\text{дэ}}$ .

Коэффициент обратной связи по ЭДС двигателя

$$K_{\text{э}} = \frac{U_{\text{зэ макс}}}{e_{\text{дв н}}} = \frac{10}{417,23} = 0,02397, \quad (3.22)$$

где  $E_{\text{дв н}}$  – ЭДС двигателя при номинальной скорости вращения

$$E_{\text{дв н}} = C \cdot \omega_{\text{дв н}} = 7,97 \cdot 52,35 = 417,23 \text{ В}; \quad (3.23)$$

$$U_{\text{зэ макс}} = 10 \text{ В}.$$

Коэффициент передачи входной цепи обратной связи регулятора ЭДС

$$K_{\text{оэ}} = \frac{K_{\text{э}}}{K_{\text{дн}}} = \frac{0,02397}{0,02} = 1,1985. \quad (3.24)$$

Для оптимизации контура принимаем И – РЭ с передаточной функцией

$$W(p)_{\text{рэ}} = \frac{K_{\text{рэ}}}{T_{\text{рэ}} \cdot p}, \quad (3.25)$$

где  $K_{\text{рэ}}$  – коэффициент усиления регулятора; принимаем

$$K_{pэ} = \frac{K_{ТВ}}{K_{э} \cdot K_{ф} \cdot K \cdot \omega_{\max}} = \frac{0,4545}{0,02397 \cdot 0,004193 \cdot 126,7 \cdot 104,7} = 0,341; \quad (3.26)$$

$K_{ф}$  – коэффициент пропорциональности между потоком и током возбуждения на начальном участке кривой намагничивания (при максимальной скорости привода)

$$K_{ф} = \frac{\Phi_{\min}}{I_{В\min}} = \frac{0,03145}{7,5} = 0,004193 \text{ Вб/А}; \quad (3.27)$$

$\omega_{\max}$  – максимальная скорость двигателя при ослабленном поле

$$\omega_{\max} = 104,7 \text{ рад/с};$$

$T_{pэ}$  – постоянная времени регулятора.

Передаточная функция замкнутого контура

$$W(p)_{э\text{ зам}} = \frac{1}{K_{э}} \cdot \frac{(T_{фэ} \cdot p + 1)}{T_{pэ} \cdot T_{ТВ} \cdot T_{фэ} \cdot p^3 + T_{pэ} \cdot (T_{ТВ} + T_{фэ}) \cdot p^2 + T_{pэ} \cdot p + 1}. \quad (3.28)$$

Из условия приближенной настройки на МО

$$T_{pэ} = a_{э} \cdot (T_{ТВ} + T_{фэ}) = (1,3 \div 2) \cdot (0,0245 + 0,0277) = 0,0679 \div 0,1044 \text{ с}, \quad (3.29)$$

$$\text{где } T_{фэ} = T_{дв} = \frac{L_{дв}}{R_{дв}} = \frac{0,00046}{0,0166} = 0,0277 \text{ с} - \text{ постоянная времени фильтра}$$

цепи обратной связи;

$a_{э}$  – коэффициент оптимизации контура,  $a_{э} = 1,3 \div 2$ .

Компенсация влияния форсирующего звена в числителе передаточной функции замкнутого контура ЭДС может быть достигнута установкой на его входе фильтра

$$W_{ф\text{ вх}} = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1} \quad (3.30)$$

с постоянной времени  $T_2 = T_{фэ}$ . Однако, поскольку  $U_{зэ} = \text{const}$  и контур работает только по возмущению, входной фильтр можно не устанавливать.

Установившаяся ошибка отработки заданного значения ЭДС двигателя оптимизированным контуром

$$\Delta E_{дв\text{ уст}} = 0. \quad (3.31)$$

Показатели работы замкнутого контура ЭДС можно оценить только при рассмотрении совместной работы двух систем регулирования: САР скорости и САР ЭДС, что можно сделать методом имитационного моделирования. Окончательную настройку контура (определение постоянной времени регулятора  $T_{рз}$  и фильтра в цепи обратной связи  $T_{фз}$ ) выполним в ходе имитационных исследований.

### 3.8 Расчет статических характеристик электропривода

#### *РЕЖИМ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ*

Структурная схема электропривода для режима стабилизации скорости приведена на рисунке 3.12. Для вывода уравнения электромеханической характеристики электропривода составим систему уравнений, которые описывают его в статике:

$$\begin{aligned}
 U_{урс} &= U_z - U_{ос}; \\
 U_{рс} &= k_{рс} \cdot U_{урс}; \\
 U_{урм} &= U_{рс} - U_{ом}; \\
 U_{ом} &= k_{ом.э} \cdot k_{ом.} \cdot I_{мн}; \\
 U_{ос} &= k_{ос} \cdot k_{дс} \cdot \omega; \\
 U_{рм} &= k_{рм} \cdot U_{урм}; \\
 e_{мн} &= k_{мн} \cdot U_{рм}; \\
 E_{дв} &= E_{мн} - I \cdot R_{яц}; \\
 \omega &= \frac{E_{дв}}{c}, \tag{3.32}
 \end{aligned}$$

Решив систему уравнений относительно угловой скорости  $\omega$ , получим

$$\omega = \frac{k_d \cdot k_{мн} \cdot k_{рм} \cdot k_{рс} \cdot U_{зс}}{1 + k_d \cdot k_{мн} \cdot k_{рм} \cdot k_{рс} \cdot k_{ос} \cdot k_{дс}} - I_{дв} \cdot \frac{k_d \cdot (R_{яц} + k_{мн} \cdot k_{рм} \cdot k_{дм} \cdot k_{ом})}{1 + k_d \cdot k_{мн} \cdot k_{рм} \cdot k_{рс} \cdot k_{ос} \cdot k_{дс}}, \tag{3.33}$$

где

$$k_d = \frac{1}{c} - \text{коэффициент двигателя};$$

$k_{pm} = 10000$  – коэффициент усиления ПИ-регулятора тока в статике (принимается собственный коэффициент усиления операционного усилителя).

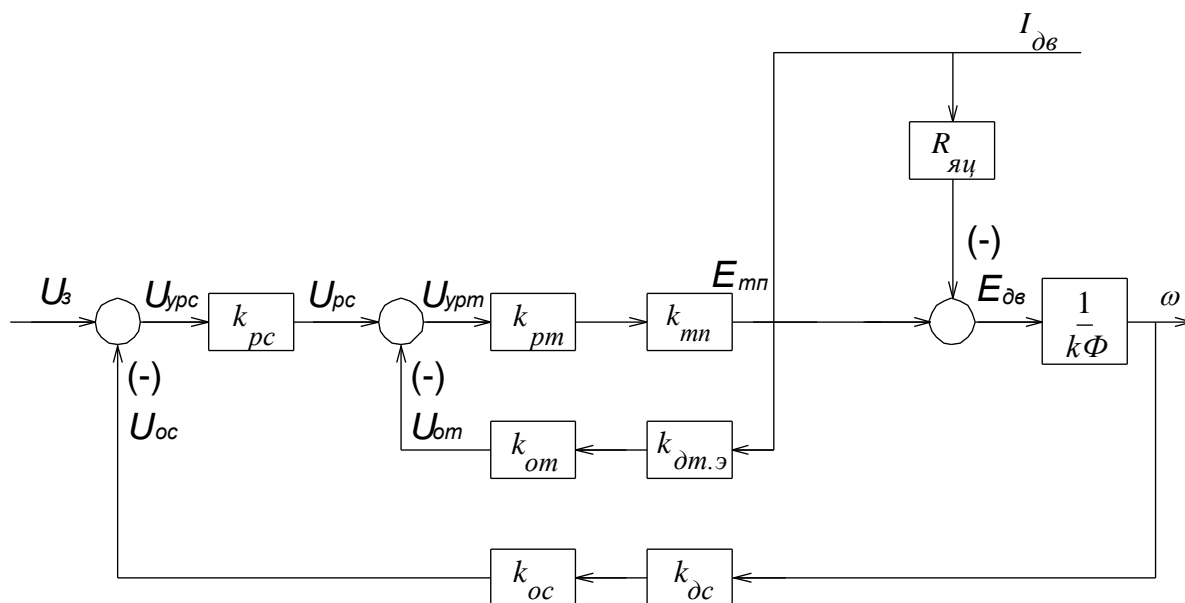


Рисунок 3.12 - Структурная схема электропривода в режиме стабилизации скорости

Подставив численные значения параметров, получим при  $\Phi_{ном}$

$$\omega = \frac{0,1261 \cdot 98,412 \cdot 10000 \cdot 40 \cdot U_{зс}}{1 + 0,1261 \cdot 98,412 \cdot 10000 \cdot 40 \cdot 0,3 \cdot 0,315} - I \cdot \frac{0,1261 \cdot (0,03 + 98,42 \cdot 10000 \cdot 0,0033 \cdot 1,21)}{1 + 0,1261 \cdot 98,412 \cdot 10000 \cdot 40 \cdot 0,3 \cdot 0,315}. \quad (3.34)$$

После преобразований

$$\omega = 10,582 \cdot U_{зс} - I \cdot 1,056441 \cdot 10^{-3}. \quad (3.35)$$

Для построения электромеханических характеристик при различных задающих напряжениях  $U_{зс}$  произведем расчет для трех значений тока. Погрешность поддержания скорости определим по выражению

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega(I_H)}{\omega_0 + \omega(I_H)} \cdot 100\%. \quad (3.36)$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Расчётные данные для построения статических характеристик

$I, A$	0	1370	2500	
$U, B$	$\omega, \text{ рад/с}$			$\delta, \%$
1	10,582	9,135	7,941	7,3
2,5	26,455	25,008	23,814	2,94
5	52,91	51,463	50,269	1,47
8 *	84,656	83,209	82,015	0,86
10 **	105,82	104,373	103,18	0,69

\* –  $\Phi = 0,06875 Bб$  ; \*\* –  $\Phi_{мин} = 0,055 Bб$

По данным таблицы 3.1 на рисунке 3.13 построены электромеханические характеристики электропривода в режиме стабилизации скорости.

Как следует из таблицы 3.1 погрешность поддержания скорости на нижней регулировочной характеристике с  $U_{зс} = 1B$  составляет 7,3%, что можно считать удовлетворительным результатом для привода подъемной лебедки.

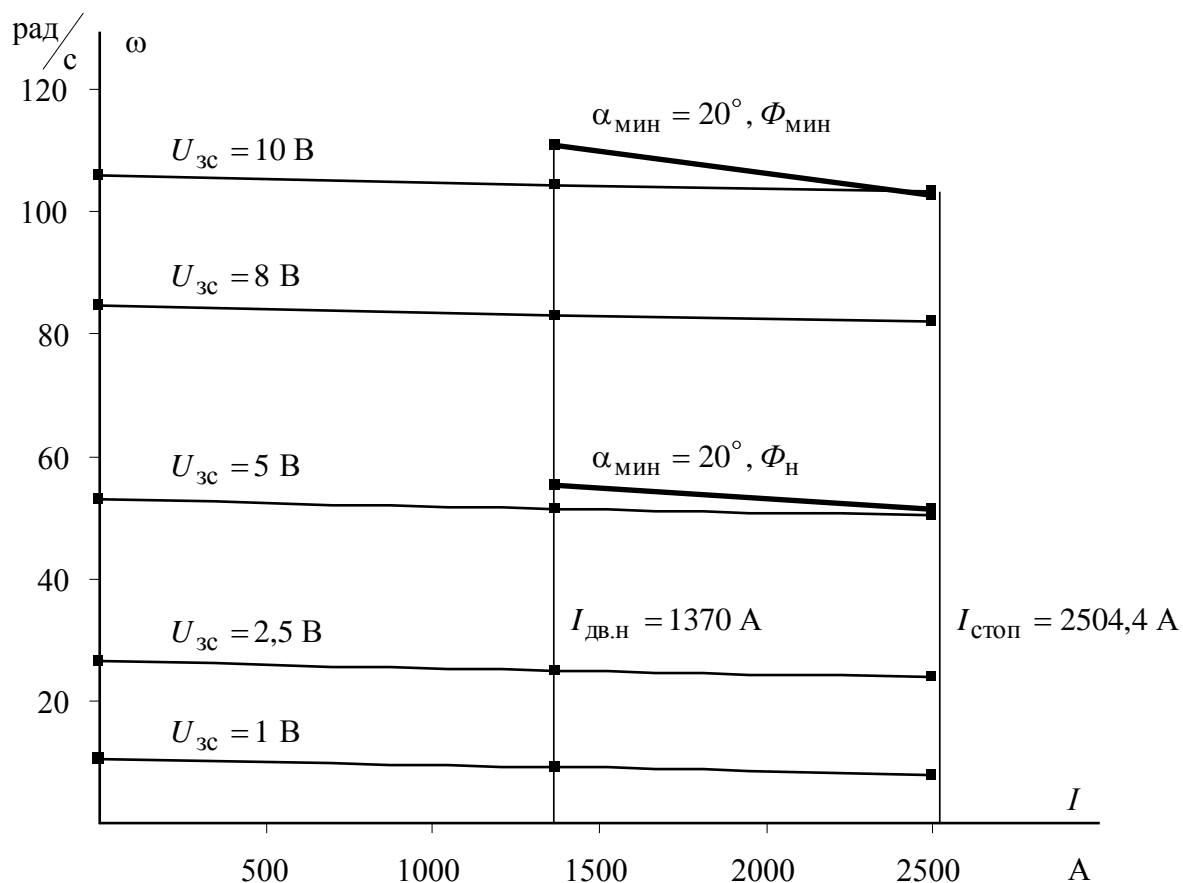


Рисунок 3.13 – Электромеханические характеристики электропривода

## РЕЖИМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА

Структурная схема электропривода в режиме стабилизации тока приведена на рисунке 3.14.

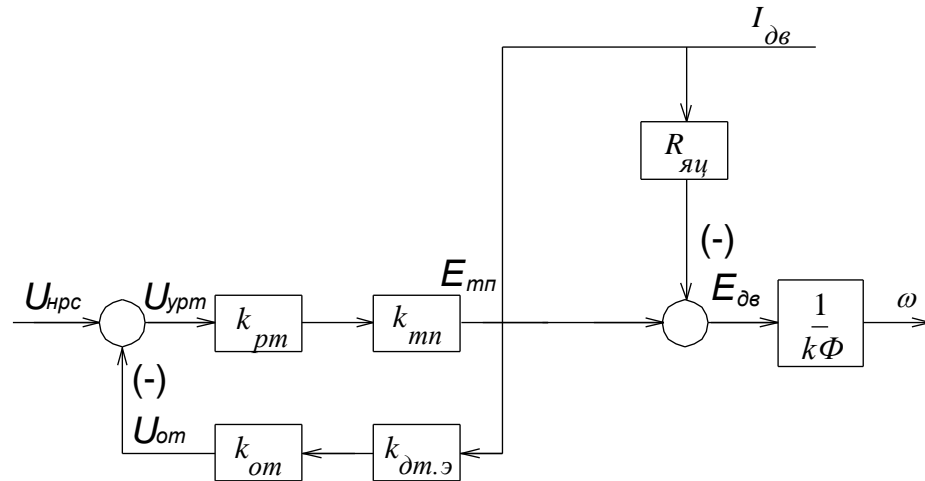


Рисунок 3.14 – Структурная схема электропривода в режиме стабилизации тока

Режим стабилизации тока возникает тогда, когда регулятор скорости вошёл в насыщение, и его выходное напряжение равно максимальному  $U_{pc.макс}$ .

Напряжение на входе регулятора скорости, при котором регулятор входит в насыщение, определим по формуле

$$\Delta U_{pc} = \frac{U_{pc.нас}}{k_{pc}} = \frac{10}{40} = 0,25 B. \quad (3.37)$$

Составим систему уравнений, которые описывают электропривод в статике в режиме стабилизации тока:

$$\begin{aligned} U_{урт} &= U_{pc.макс} - U_{ом}; \\ U_{ом} &= k_{ом} \cdot k_{ом.э} \cdot I_{mn}; \\ U_{pt} &= k_{pt} \cdot U_{урт}; \\ E_{mn} &= k_{mn} \cdot U_{pt}; \\ E_{\delta в} &= E_{mn} - I \cdot R_{яц}; \\ \omega &= E_{\delta в} / c. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Решив систему уравнений относительно тока якоря двигателя  $I_{\partial\phi}$ , получим

$$I_{\partial\phi}(\omega) = \frac{k_{mn} \cdot k_{pm} \cdot U_{pc.макс}}{R_{яц} + k_{mn} \cdot k_{pm} \cdot k_{\partial m} \cdot k_{om}} - \frac{\omega}{k_{\partial} \cdot (R_{яц} + k_{mn} \cdot k_{pm} \cdot k_{\partial m} \cdot k_{om})}$$

Подставив численные значения параметров, получим при  $\Phi_{ном}$

$$I_{\partial\phi} = \frac{98,412 \cdot 10000 \cdot U_{pc.макс}}{0,03 + 98,412 \cdot 10000 \cdot 0,0033 \cdot 1,21} - \frac{\omega}{0,1261 \cdot (0,03 + 98,412 \cdot 10000 \cdot 1,21)} \quad (3.39)$$

После преобразований

$$I_{\partial\phi} = 2504,4 - 0,01597565 \cdot \omega.$$

Задавая значения скорости, рассчитываем характеристики. Полученные результаты сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

$\omega, рад/с$	0	52,35
$I, А$	2504,4	2503,6

График электромеханической характеристики  $I_{\partial\phi}(\omega)$  для режима стабилизации тока приведен на рисунке (3.13. стр. 50) Как следует из расчета, система регулирования точно держит максимальный ток электропривода на заданном допустимом значении 2500 А.

### **РЕЖИМ ОГРАНИЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО УГЛА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

При достижении минимального угла управления преобразователем электропривод выходит на предельную характеристику разомкнутой системы ТП–Д

$$\omega_{макс} = \frac{\cos \alpha_{мин} - R_{яц} \cdot I_{\partial\phi}}{k \Phi_{\partial\phi}} = \frac{512,6 \cdot \cos 20 - 0,03 \cdot I_{\partial\phi}}{72,09 \cdot \Phi_{\partial\phi}} \quad (3.40)$$

Результаты работы сведены в таблицу 3.3.



Таблица 3.3

	$\Phi_{\text{дв.ном}} = 0,11 \text{ Вб}$		$\Phi_{\text{дв.мин}} = 0,055 \text{ Вб}$	
$I_{\text{дв}}, \text{А}$	1370	2500	1370	2500
$\omega_{\text{дв}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	55,4	51,214	110,98	102,57

Из полученных результатов следует, что предельные характеристики разомкнутой системы практически не ограничивают область существования электромеханических характеристик замкнутой системы электропривода.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ ЛЕБЕДКИ

### 4.1 Структурная схема нелинейной САУ ЭП подъемной лебедки

Основными нелинейностями САУ электропривода подъемной лебедки являются:

- насыщение регуляторов скорости, тока якоря, ЭДС и тока возбуждения

$$U_{\text{рс}} = \pm 10 \text{ В}; U_{\text{ртя макс}} = \pm 10 \text{ В}; U_{\text{рэ}} = \pm 10 \text{ В}; U_{\text{ртив макс}} = \pm 10 \text{ В};$$

- постоянное по величине ограничение тока двигателя в переходных режимах, которое достигается ограничением выходного напряжения регулятора тока якоря на уровне

$$U_{\text{ртя доп}} = K_{\text{т}} \cdot I_{\text{ЭП макс}} = 0,004 \cdot 2500 = 10 \text{ В}; \quad (4.1)$$

- насыщение тиристорного преобразователя, соответствующее минимальному углу управления  $\alpha_{\text{мин}} = 10^\circ$

$$E_{\text{ТПЯ макс}} = E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\text{мин}} = 512 \cdot \cos 6^\circ = 509,2 \text{ В}; \quad (4.2)$$

- насыщение тиристорного возбудителя

$$E_{\text{ТПВ макс}} = \frac{E_{d0\text{В}}}{2} (1 + \cos \alpha_{\text{мин}}) = \frac{342}{2} (1 + \cos 30^\circ) = 319 \text{ В}; \quad (4.3)$$

- изменение значения коэффициента ЭДС и электромагнитного момента  $C = K \cdot \Phi_{\text{дв}}$  во второй зоне регулирования;

— основным нелинейным элементом электропривода является нереверсивный тиристорный преобразователь, который имеет одностороннюю проводимость групп вентилей, дискретный характер управления, нелинейную регулировочную характеристику.

При моделировании дискретного тиристорного преобразователя должны быть введены следующие параметры:

$m_B = 6$  – число коммутаций в схеме за один период;

$e_{2m} = \sqrt{2} \cdot E_{2л} = \sqrt{2} \cdot 380 = 537,4 \text{ В}$  – амплитуда питающего напряжения преобразователя;

$K_{yo} = \frac{\alpha_{нач} - \alpha_{мин}}{180^\circ} = \frac{120^\circ - 10^\circ}{180^\circ} = 0,611$  – коэффициент управляющего органа на входе СИФУ;

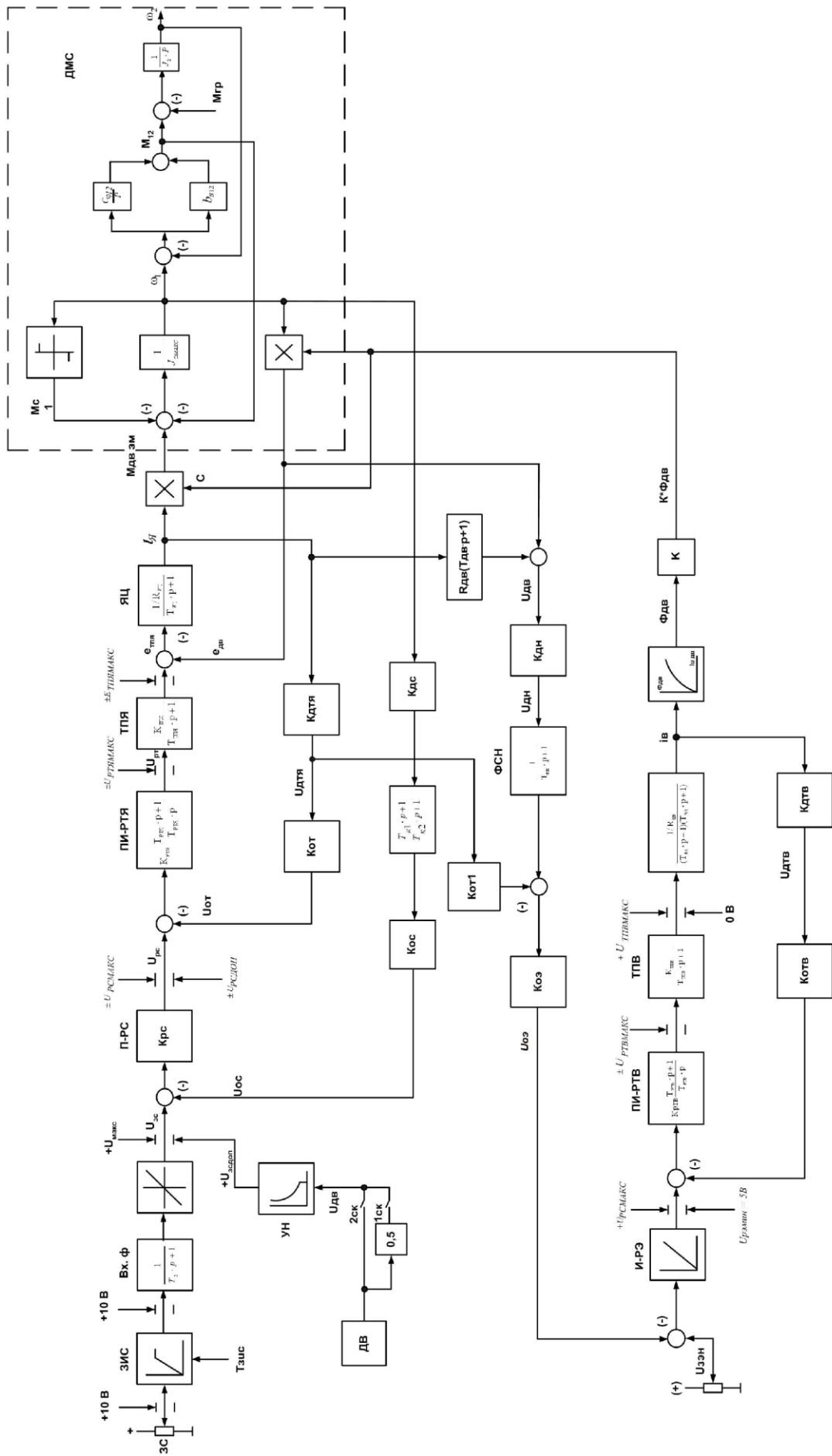


Рисунок 4.1-Структурная схема нелинейной САУ электропривода полемосъемной лентой

$\alpha_{\text{мин}} = 20^\circ$  - минимальный угол управления;

$\alpha_{\text{нач}} = 120^\circ$  - начальный угол управления;

$\alpha_{\text{макс}} = 150^\circ$  - максимальный угол управление преобразователем;

$2 \cdot U_{\text{оп макс}} = 10 \text{ В}$  – форма опорного напряжения линейная с амплитудой размаха напряжения.

Структурная схема нелинейной САУ электропривода подъемной лебедки приведена на рисунке 4.1.

Расчетные и экспериментальные (отмеченные \*) параметры звеньев структурной схемы электропривода приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Параметры нелинейной САУ электропривода механизма подъемной лебедки

$U_{\text{зс}}, \text{В}$	$T_{\text{зис}}, \text{с}$	$U_{\text{зис}}, \text{В}$	$K_{\text{рс}}$	$U_{\text{рс макс}}, \text{В}$	$K_{\text{с}}, \text{В} \cdot \text{с/рад}$	$K_{\text{ос}}$	$K_{\text{дс}}, \text{В} \cdot \text{с/рад}$
10	$\geq 4$	10	$40,21 \div 48,3$	$\pm 10$	0,095	0,3	0,315
$K_{\text{рт}}$	$T_{\text{рт}}, \text{с}$	$U_{\text{рт макс}}, \text{В}$	$K_{\text{т}}, \text{В/А}$	$K_{\text{дт}}, \text{В/А}$	$K_{\text{от}}$	$K_{\text{пия}}$	$T_{\text{пия}}, \text{с}$
0,3974	0,0175	$\pm 10$	0,004	0,00333	1,21	98,412	0,00167
$E_{\text{пия макс}}, \text{В}$	$R_{\text{яц}}, \text{Ом}$	$T_{\text{яц}}, \text{с}$	$L_{\text{яц}}, \text{Гн}$	$R_{\text{дв}}, \text{Ом}$	$T_{\text{дв}}, \text{с}$	$L_{\text{дв}}, \text{Гн}$	$c$
504,8	0,02983	0,0175	0,000524	0,0166	0,0276	0,00046	7,97
$J_{\text{эI}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$J_{\text{эII}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$M_{\text{с}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$U_{\text{зэ}}, \text{В}$	$K_{\text{рэ}}$	$T_{\text{рэ}}^*, \text{с}$	$U_{\text{рэ макс}}, \text{В}$	$K_{\text{э}}$
$53,084 \div 56,17$	$50,59 \div 61,31$	1506,4	10	0,341	Подбирается при настройке	$\pm 10$	0,02397
$K_{\text{дн}}$	$K_{\text{оэ}}$	$T_{\text{фн}}^*, \text{с}$	$U_{\text{зтвн}}, \text{В}$	$K_{\text{рत्व}}$	$T_{\text{рत्व}}, \text{с}$	$K_{\text{тत्व}}$	$T_{\text{тत्व}}, \text{с}$
0,02	1,1985	0,0277	10	7,955	0,798	71,52	0,005
$E_{\text{тत्व макс}}, \text{В}$	$R_{\text{цв}}, \text{Ом}$	$T_{\text{тв1}}, \text{с}$	$T_{\text{тв2}}, \text{с}$	$K$	$K_{\text{тв}}$	$K_{\text{дтв}}$	$K_{\text{отв}}$
319	7,865	0,798	0,00726	126,7	0,45	0,333	1,351

Параметры нереверсивного дискретного тиристорного преобразователя якоря приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Параметры нереверсивного дискретного ТПЯ

$K_{\text{ТПЯ}}$	$m_{\text{в}}$	$e_{2\text{м}},$ В	СИФУ	$K_{\text{УО}}$	$2 \cdot U_{\text{оп макс}}, \text{В}$	$\alpha_{\text{мин}},$ град
98,4	6	537	ЛИН	0,611	10	10
$\alpha_{\text{макс}},$ град	$\alpha_{\text{нач}},$ град	$\varphi_{\text{макс}},$ град	АУТП	ПОС	$U_{\text{рэ доп}},$ В	
150	120	150	нет	Нет	10	

## 4.2 Настройка САУ электропривода на имитационной модели

Для обеспечения работоспособности контура ЭДС с учетом пульсации выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя в цепи обратной связи по напряжению установлен сглаживающий фильтр с постоянной времени  $T_{\text{фн}} = T_{\text{дв}} = 0,0277 \text{ с}$ .

На входе электропривода установлен задатчик скорости ЗИ, обеспечивающий постоянный темп разгона и торможения при остановке электропривода. Постоянная времени ЗИ по технологии  $T_{\text{зи}} \geq (6 \div 8) \text{ с}$ .

## 4.3 Исследование САУ электропривода на имитационной модели (Matlab Simulink)

Цель исследований – проверка работоспособности электропривода во всех основных технологических режимах работы.

Исследования сводились к проверке работы САУ электропривода в следующих режимах:

- пуск привода при разных значениях управления и нагрузки;
- наброс нагрузки вплоть до режима стопорения;
- внезапного стопорения;

– торможение электропривода до меньшей скорости и до полной остановки.

Результаты исследований на имитационной модели приведены на рисунках 4.2-4.11. Анализ переходных процессов показал, что САУ электропривода полностью отвечает предъявленным требованиям. Пульсации тока якоря достигают 33% от  $I_{двн}$  при работе на малых скоростях. На рисунках 4.10 и 4.11 показаны диаграммы работы системы нереверсивный ТПЯ - Д. Вопрос применения сглаживающих реакторов в цепи двигателя требует дальнейшей проработки.

Диапазон регулирования достигает 100 при статической погрешности на нижней характеристике порядка 0,55 рад/с (см. рисунок 4.3). Время переходных процессов определяется постоянной времени ЗИ (см. рисунок 4.4). Электропривод достаточно быстро реагирует на возмущающее воздействие по нагрузке (см. рисунок 4.5 и 4.6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе спроектирован и исследован электропривод подъемной лебедки буровой установки БУ-2900/200. Выбраны элементы и рассчитаны параметры силовой цепи и цепи возбуждения, выполнен синтез и оптимизация контуров регулирования, определены параметры настройки электропривода. С помощью прикладных программ проведены имитационные исследования основных режимов работы привода в первой и второй зоне регулирования скорости. Анализ полученных результатов подтвердил соответствие показателей качества ожидаемым. Кроме того в работе проанализировано влияние основных нелинейностей системы на динамику электропривода.

Требования предъявляемые к электроприводу:

1. Режим работы электропривода - длительный (S1).
2. Диапазон регулирования электропривода 1:100.
3. Максимальное напряжение управления 10 В.
4. Электропривод должен быть безопасен и удобен в эксплуатации, иметь систему защит и сигнализацию.
5. Погрешность скорости при изменении нагрузки не более 5%.

Результате исследований анализ переходных процессов показал, что САУ электропривода полностью отвечает предъявленным требованиям. Пульсации тока якоря достигают 33% от  $I_{двн}$  при работе на малых скоростях. Вопрос применения сглаживающих реакторов в цепи двигателя требует дальнейшей проработки.

Диапазон регулирования достигает 100 при статической погрешности на нижней характеристике порядка 0,55 рад/с. Время переходных процессов определяется постоянной времени ЗИ. Электропривод достаточно быстро реагирует на возмущающее воздействие по нагрузке.

На основании приведённых исследований и расчетов показано, что спроектированный электропривод удовлетворяет требованиям технического

задания и может быть использован в качестве электропривода подъемной лебедки буровой установки с двухзонным регулированием скорости.

Экономическая часть работы посвящена анализу проведения бригадой пусконаладочных работ (ПНР) регулируемого электропривода буровой лебедки: определена структура и этапы проведения ПНР, произведен выбор состава и численности бригады для проведения ПНР, а также рассчитана сметная стоимость ПНР.

В работе также рассмотрены вопросы безопасности и экологичности, электробезопасности, промышленной санитарии и пожарной безопасности при монтаже, наладке и обслуживании электропривода на буровой установке.



## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Дудля Н.А. Проектирование буровых машин и механизмов: Учебник - К.:Выща шк.,1990. - 390 с.
2. Документация по обслуживанию электропривода лебедки буровой установки БУ 2900/200 ЭПК-БМ
3. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. - Томск: Изд. ТЛИ им. С.М. Кирова, 1991. - 104 с.
4. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник/ И.Х.Евзеров и др.; под ред. В.М.Перельмутора. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 319с.
5. Тарабин Б.В., Лунин Л.Ф., Смирнов Ю.Н. Интегральные микросхемы: Справочник. - М.: Энергоиздат, 1985. - 528 с.
6. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. - Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. - Оптимизация контура регулирования. - Томск: Изд. ТПУ, 2000.-144с.
7. Броун С.И., Хоботько В.И. Программированное руководство по безопасному ведению буровых работ. - М.: Недра, 1978.
8. С.И. Броун. Охрана труда в бурении. - М.: Недра, 1981.
9. Правила безопасности в нефтегазодобывающей промышленности. Изд.2. - М.: Недра, 1975.
10. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ) и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей (ПТБ). - М.: Атомиздат, 1972.
11. Техника безопасности в нефтяной промышленности. - Труды ВНИИТЬ, вып. XIX - XXVII, 1970 - 1977.
12. Система стандартов безопасности труда. Сборники ГОСТов. 4 тома. - М.: издательство стандартов, 1971.
13. Охрана труда в машиностроении. Под редакцией Е.Я. Юдина. - М.: Машиностроение, 1983.

14. Противопожарные требования. Основные положения проектирования СНИП /П-А.5-70.-М.:1971.

15. Методическое пособие для расчета вибрации. - Т.: ТПУ Д989.

16. Панов Г. Е., Броун С. И. Охрана окружающей среды в нефтегазодобывающей промышленности. - М.: ВНИИОЭНГ, 1988.

17. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 120 с.

18. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 152 с.

19. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П, Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.6. Механическая система электроприводов постоянного тока: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 144 с.

20. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А.Елисеева и А.В.Шинянского.- М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

21. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/ Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Сомова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.

22.Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986, 648 с.

23. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. – М.: Стройиздат, 1996.

24. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.